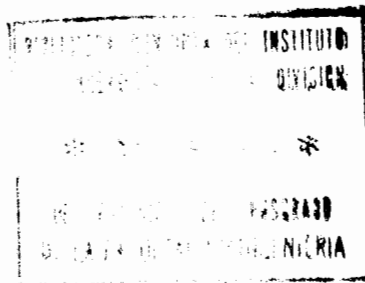


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERIA



DIMENSIONAMIENTO DE LA CAPACIDAD  
PARA SEDIMENTOS EN LOS EMBALSES.

M en I DANIEL F. CAMPOS ARANDA

# INDICE GENERAL

OBJETIVO Y ALCANCE DEL TRABAJO.	1
DESCRIPCION GENERAL DEL CONTENIDO.	2
CAPITULO 1: EL PROBLEMA DE LA SEDIMENTACION DE LOS EMBALSES.	3
1.1 Origen del problema.	3
1.2 Descripción del proceso de sedimentación.	4
1.3 Factores que influyen en la magnitud de la sedimentación.	4
1.4 Sedimentación en la entrada al embalse.	4
1.5 Degradación aguas abajo del embalse.	6
1.6 Consecuencias de la sedimentación de los embalses.	6
1.7 Diseño hidrológico considerando la acumulación de -- los sedimentos.	7
CAPITULO 2: IDEAS GENERALES SOBRE LA EROSION HIDRICA EN LA - CUENCA.	9
2.1 Tipos de erosión.	9
2.2 Consecuencias de la erosión hídrica.	10
2.3 Mecanismo de la erosión hídrica y factores que lo go biernan.	10
2.4 Formas de erosión en el terreno.	12
2.5 Pérdida de suelo: Daños y criterios de evaluación.	14
2.6 Sedimentación del material erosionado.	14
CAPITULO 3: METODOLOGIA PROPUESTA PARA LA ESTIMACION DE LA - CAPACIDAD REQUERIDA PARA SEDIMENTOS (Exposición General).	16
3.1 Generalidades.	16
3.2 Clasificación de los métodos de estimación de la apor tación de sedimentos.	16
3.3 Síntesis de la metodología propuesta.	18
CAPITULO 4: EVALUACION DE LA APORTACION DE SEDIMENTOS DE LA CUENCA.	21
4.1 Definiciones.	21
4.2 Factores que afectan la magnitud de la aportación de sedimentos.	21
4.3 Criterios empíricos de estimación de la aportación de sedimentos.	22
4.4 Ventajas y desventajas de los criterios empíricos.	36
4.5 Estimación de la aportación de sedimentos de la cuen ca, utilizando la Fórmula Universal de Pérdida de -- Suelo (FUPS).	37
4.6 Cuantificación de la aportación de sedimentos de la cuenca, a partir de la erosión total.	41
4.7 Evaluación de la aportación de sedimentos de la cuen ca, en base a la estimación del transporte de mate-- riales sólidos.	46
4.8 Método estocástico de predicción de la aportación de sedimentos de una cuenca.	53
4.9 Selección del valor de la aportación de sedimentos - de la cuenca.	55

CAPITULO 5: DETERMINACION DEL PESO ESPECIFICO DE LOS SEDIMENTOS DEPOSITADOS.	56
5.1 Necesidad de tal estimación.	56
5.2 Características generales de los sedimentos que llegan a los embalses.	56
5.3 Factores generales que influyen en la determinación del peso específico de los sedimentos.	57
5.4 Criterios que se presentan.	58
5.5 Recomendaciones para la aplicación de los criterios expuestos.	62
CAPITULO 6: ESTIMACION DE LA EFICIENCIA DE RETENCION DEL EMBALSE.	63
6.1 Generalidades.	63
6.2 Factores que determinan su magnitud.	64
6.3 Criterios para la estimación.	64
6.4 Simulación de la pérdida de capacidad del embalse debido a la sedimentación.	70
6.5 Sugerencias para la aplicación de los criterios presentados.	73
CAPITULO 7: PREDICCION DE LA DISTRIBUCION DE LOS SEDIMENTOS EN EL EMBALSE.	74
7.1 Generalidades.	74
7.2 Inicio del proceso general de sedimentación.	75
7.3 Formas de sedimentación.	75
7.4 Criterios para predecir la distribución de los sedimentos en el embalse.	76
7.5 Comentarios generales a los métodos expuestos.	91
CAPITULO 8: EJEMPLO DE APLICACION DE LA METODOLOGIA PROPUESTA.	93
8.1 Generalidades.	93
8.2 Información disponible (Resumen).	94
8.3 Estimación del peso específico de los sedimentos depositados y de la eficiencia de retención del embalse.	95
8.4 Determinación de la aportación de sedimentos de la cuenca.	96
8.5 Simulación de la pérdida de capacidad del vaso debida a la sedimentación.	99
8.6 Predicción de la distribución de los sedimentos en el embalse.	100
8.7 Conclusiones del estudio sobre la sedimentación del embalse "El Peaje".	101
CAPITULO 9: CONTROL DE LA SEDIMENTACION DE LOS EMBALSES.	114
9.1 Introducción.	114
9.2 Clasificación de las medidas de control de la sedimentación y su aplicabilidad.	114
9.3 Descripción general de las medidas de control de la sedimentación.	115
9.4 Valoración de las medidas de control seleccionadas.	118
CAPITULO 10: BREVE DESCRIPCION DE LAS TECNICAS PARA COMBATIR LA EROSION EN LA CUENCA.	119

10.1	Introducción.	119
10.2	Manejo de cuencas.	120
10.3	Clasificación propuesta de las medidas de conservación de suelos.	120
10.4	Conservación del suelo por medio del control de la cubierta vegetal.	120
10.5	Conservación del suelo por modificación de sus propiedades.	125
10.6	Técnicas de conservación de suelos mediante el control de las aguas.	125
10.7	Control de la erosión torrencial.	129
CONCLUSIONES GENERALES DEL TRABAJO.		131
ANEXO I: EVALUACION DE LOS TERMINOS DE LA FORMULA UNIVERSAL DE PERDIDA DE SUELO.		133
1.1	Introducción.	133
1.2	Factor de erosionabilidad del suelo (K).	134
1.3	Factor de topografía del terreno (LS).	137
1.4	Factor de cobertura vegetal y manejo de ella (C).	137
1.5	Factor de prácticas de conservación (P).	144
ANEXO II: RESUMEN DE LOS CRITERIOS PARA LA ESTIMACION DEL -- FACTOR DE EROSIVIDAD DE LA LLUVIA R, DE LA FORMULA UNIVERSAL DE PERDIDA DE SUELO.		147
II.1	Introducción.	147
II.2	Generalidades de los criterios que se presentan.	147
II.3	Indice de erosión de la lluvia (EI) de W.H. Wischmeier y D.D. Smith.	148
II.4	Relación de W.H. Wischmeier y D.D. Smith entre el factor R y el producto de tres lluvias específicas.	150
II.5	Fórmula de J.R. Williams para estimar el factor R, en base a dos características del escurrimiento.	152
II.6	Nueva relación propuesta por D.F. Campos A. entre el factor R y la lluvia máxima de duración 6 horas y período de retorno 10 años.	152
II.7	Relación de J.A. Maza A. entre el factor R y la lluvia máxima de duración 30 minutos y período de retorno 10 años.	154
II.8	Relación de J.L. Sanchez B. entre el factor R y la lluvia máxima de duración una hora.	155
II.9	Relación de W.H. Wischmeier y D.D. Smith entre el factor R y la lluvia máxima de duración 6 horas y período de retorno 2 años.	155
II.10	Relación entre el factor R y dos características de la tormenta.	156
II.11	Evaluación del factor R para una cuenca, a partir de la lluvia media mensual.	156
II.12	Relación de W.R. Evans y G. Kalkanis entre el factor R y la lluvia máxima de duración 6 horas y período de retorno 2 años.	157
II.13	Relaciones entre el factor R y la lluvia media anual.	159
ANEXO III: RESUMEN DE LOS CRITERIOS PARA LA ESTIMACION DEL -- COEFICIENTE DE ENTREGA DE SEDIMENTOS (CES).		160
III.1	Introducción.	160



III.2 Factores que determinan el CES.	161
III.3 Gráficas empíricas para estimación del CES.	161
III.4 Otras fórmulas empíricas para estimar el CES.	162
III.5 Tabla de valores empíricos para estimar el CES.	163
ANEXO IV: GLOSARIO DE TERMINOS.	171
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS <u>UTILIZADAS.</u>	178
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS <u>RECOMENDADAS.</u>	186

Un pueblo hambriento no escucha la razón,  
ni le interesa la justicia,  
ni es conmovido por las oraciones.

SENECA

## OBJETIVO Y ALCANCE DEL TRABAJO.

### INTRODUCCION.

Es del dominio público el conocimiento de los cuantiosos daños materiales y pérdida de vidas humanas, que las inundaciones causan prácticamente todos los años; -- sin embargo, son pocos los que se percatan del enorme número de personas que llevan una vida infeliz por causa del hambre, y que en ciertas regiones del mundo -- hasta mueren de inanición, porque no pueden subsistir con los escasos productos que obtienen de sus tierras erosionadas (FAO).

Las inundaciones son espectaculares, los problemas de abastecimiento de agua potable y los de desarrollo urbano son muy connotados, mas si se piensa detenidamente en la erosión de los terrenos de cultivo, de las zonas deforestadas y de los pastizales sometidos a excesivo pastoreo, se concluye que la pérdida de suelo es un problema mucho mas grave para la subsistencia de la población rural y en general para la economía de todo país, pues el material erosionado constituye además un serio problema al depositarse en algún sitio, sea éste un cauce, un puerto, otra zona de cultivo, y quizás el más importante, un embalse.

En un país como México, en donde el papel de los embalses es ya importante y está llamado a ser esencial, es perfectamente lógico, que el problema de la sedimentación de los vasos constituya ya un serio motivo de preocupación.

Sin embargo, aunque el problema es de sobra conocido por los ingenieros que realizan el diseño hidrológico del embalse, su análisis completo y práctico no ha sido abordado todavía en nuestro país.

### OBJETIVO.

Con respecto a lo anterior, el objetivo fundamental de este trabajo es dar a conocer en forma concisa y elemental los aspectos más importantes relacionados con el tema de la acumulación de sedimentos en los embalses. Más específicamente, la idea general es exponer el material o técnicas asequibles, para dar solución a los problemas que se plantean al efectuar un estudio tendiente a dimensionar la capacidad requerida para los sedimentos, estos son:

1. Cuantificación de la aportación de sedimentos de la cuenca: actual y a futuro, con la influencia de las técnicas de conservación de suelos y de las obras de control que serán construidas (capítulo 4).
2. Conversión de la aportación de sedimentos de unidades de peso, a volumen que ocupará al depositarse en el embalse (capítulo 5).
3. Estimación del porcentaje, que de la aportación de sedimentos, es retenido por el embalse (capítulo 6).
4. Predicción de la distribución de los sedimentos en el embalse (capítulo 7).

#### ALCANCE.

Así como el cálculo hidrológico de escurrimientos y avenidas de una cuenca, puede ser llevado a cabo según dos diferentes criterios, esto es, si se dispone de datos hidrométricos o no, la estimación de la aportación de sedimentos también sigue esta gran división.

De acuerdo a lo anterior, los métodos que permiten calcular la magnitud de la aportación o transporte de sedimentos se pueden clasificar en dos grandes conjuntos, estos son:

- A. METODOS QUE SE BASAN EN LOS DATOS DEL MUESTREO DE SEDIMENTOS, comprenden los definidos en el 1er., 2o. y 3er. grupos del capítulo 3.
- B. METODOS INDIRECTOS DE ESTIMACION, abarcando los definidos en los grupos: 4o., 5o., 6o. y 7o. del capítulo 3.

La metodología que se presenta, para llevar a cabo un estudio que permita dimensionar la capacidad requerida para sedimentos por un embalse, está enfocada a los casos en los que no se dispone de datos de muestreo de sedimentos, ni de información sobre los materiales de que está formado el cauce, situación bastante común cuando se diseñan hidrológicamente embalses medianos y pequeños, en casi todas las zonas de México.

#### DESCRIPCION GENERAL DEL CONTENIDO.

Inicialmente se presenta en el cap.1 una serie de ideas generales sobre el problema de la sedimentación de los embalses; en seguida en el cap. 2, se exponen de manera concisa los conceptos más relevantes sobre la erosión hídrica, sus formas y sus consecuencias.

En el cap. 3 se describe a grandes rasgos el planteamiento de la metodología general de un estudio encausado al diseño de la capacidad requerida para sedimentos; a continuación se explican en el cap. 4, la colección de técnicas que integran la metodología adecuada a la escasez de datos en México, que ya fue comentada. Posteriormente, en los capítulos 5, 6 y 7 se dan a conocer las herramientas complementarias para efectuar el estudio citado y en el cap. 8 se desarrolla un ejemplo de aplicación de todo lo expuesto anteriormente, en los cuatro capítulos precedentes.

En los capítulos 9 y 10 finales se resumen las técnicas actuales para tratar de evitar o reducir la magnitud de la sedimentación. Por último, se presentan en anexos algunos temas que no fueron incluidos anteriormente, para no perder la idea fundamental de la metodología, entre ellos los que correspondieron a investigaciones de tipo bibliográfico.

Todo el mundo desea saber,  
pero nadie quiere pagar el precio.

JUVENAL

## CAPITULO 1: EL PROBLEMA DE LA SEDIMENTACION DE LOS EMBALSES

### 1.1 ORIGEN DEL PROBLEMA.

En nuestro país, las lluvias y por consecuencia el escurrimiento, presentan grandes variaciones estacionales y en algunos sitios hasta incertidumbre en su ocurrencia, debido a esto, ha sido necesario almacenar agua durante la época llamada de lluvias, en embalses grandes y pequeños, para utilizar esta agua ya regulada en la temporada de estiaje.

La época de lluvias está generalmente confinada a los cinco meses del año en los que ocurren los ciclones (junio a octubre) y contrariamente a lo anterior las demandas para riego, agua potable y generación de energía eléctrica se distribuyen a todo lo largo del año. Entonces, la regulación de las aguas por medio de embalses, es a la fecha la estrategia más factible para obtener grandes beneficios de la caprichosa naturaleza.

Desafortunadamente, los ríos y arroyos no aportan solamente agua, sino que también transportan sedimentos, es decir, materiales que han sido erosionados aguas arriba en su cuenca o propio cauce y debido a lo anterior, puede afirmarse que todo embalse grande o pequeño, para abastecimiento de agua o para control de avenidas, estará sujeto a un cierto grado de sedimentación (85,1)\*.

En general, la sedimentación de los embalses es reducible pero rara vez evitada, en este caso el grupo de ingenieros o hidrólogos que integran el proyecto deberán de dar solución a los problemas expuestos al inicio del trabajo.

Por otra parte, el problema de la sedimentación de los vasos y sus soluciones están estrechamente relacionados con la erosión en la cuenca, pues básicamente todo el sedimento transportado por las corrientes, al embalse, es aportado por la pérdida de suelo (78,1).

\* Los números entre paréntesis corresponderán, el primero a la clave que se dio a la referencia bibliográfica utilizada y el segundo a su página que fue consultada.

## 1.2 DESCRIPCION DEL PROCESO DE SEDIMENTACION.

### 1.2.1 GENERALIDADES.

Por lo común, la construcción de un embalse en un río altera su equilibrio natural cambiando las características hidráulicas del flujo y la capacidad de transporte de sedimentos. En el proceso de ajuste a un nuevo perfil de equilibrio para las condiciones recientes, se crean problemas adicionales, aguas abajo y aguas arriba del embalse (25,13).

J.M. Pliego clasifica los problemas adicionales a la sedimentación en el vaso, en dos fenómenos distintos (69,3): un rejuvenecimiento del ciclo erosivo aguas abajo del embalse y un envejecimiento de éste aguas arriba.

Al primero de estos fenómenos se le conoce con el nombre de DEGRADACION y es el proceso contrario al segundo o SEDIMENTACION; en la degradación el cauce erosiona sus orillas y socava su fondo, descendiendo éste, en cambio en la sedimentación la corriente no tiene la energía necesaria para transportar el sedimento y éste se deposita elevando el fondo.

Estos dos fenómenos serán discutidos con mayor detalle posteriormente.

### 1.2.2 EL PROCESO DE SEDIMENTACION EN EL EMBALSE.

Desde un punto de vista teórico elemental el movimiento de los sedimentos al entrar a un embalse, está gobernado por dos fuerzas dinámicas actuando en las partículas. Una de ellas tiene dirección horizontal y la otra, tiene dirección vertical. Esta última es originada por la atracción de la gravedad y por las fuerzas ascendentes y descendentes debidas a la turbulencia del agua (5.2).

Cuando el escurrimiento entra al embalse, la sección transversal del cauce se incrementa notoriamente y esto es acompañado de un decrecimiento en la magnitud de la velocidad del flujo, hasta que llega a ser insuficiente para transportar el sedimento y las partículas comienzan a depositarse.

La forma en que los sedimentos se distribuyen en el embalse depende de varios factores interrelacionados (cap. 7), pero puede decirse que siguen un modelo más o menos común en todos los vasos, esto es: los sedimentos gruesos son depositados en el remanso que la corriente forma al entrar al embalse y en el inicio del vaso formando los denominados deltas; en cambio, las partículas finas son transportadas dentro del vaso, frecuentemente por las corrientes de densidad\* y son depositadas en las partes más bajas y quietas del embalse (5,2). Esta forma general de sedimentación puede ocurrir simultáneamente en las dos direcciones, hacia aguas arriba y hacia el interior del vaso (79,747). En la Fig.1.1 de la página siguiente se muestra en forma esquemática, la distribución general de los sedimentos en los embalses (44,204).

## 1.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA MAGNITUD DE LA SEDIMENTACION.

Puede afirmarse que los factores que influyen o determinan la magnitud de la sedimentación de un vaso, son definitivamente los mismos que determinan la llamada "Eficiencia de Retención del Embalse" (capítulo 6), la cual se define como el porcentaje que de los sedimentos que llegan al vaso son reternidos o trapados por éste.

Aclarando que con relación a los sedimentos, no solamente sus características físicas son importantes sino también su cantidad, es decir, la magnitud de la aportación de sedimentos de la cuenca.

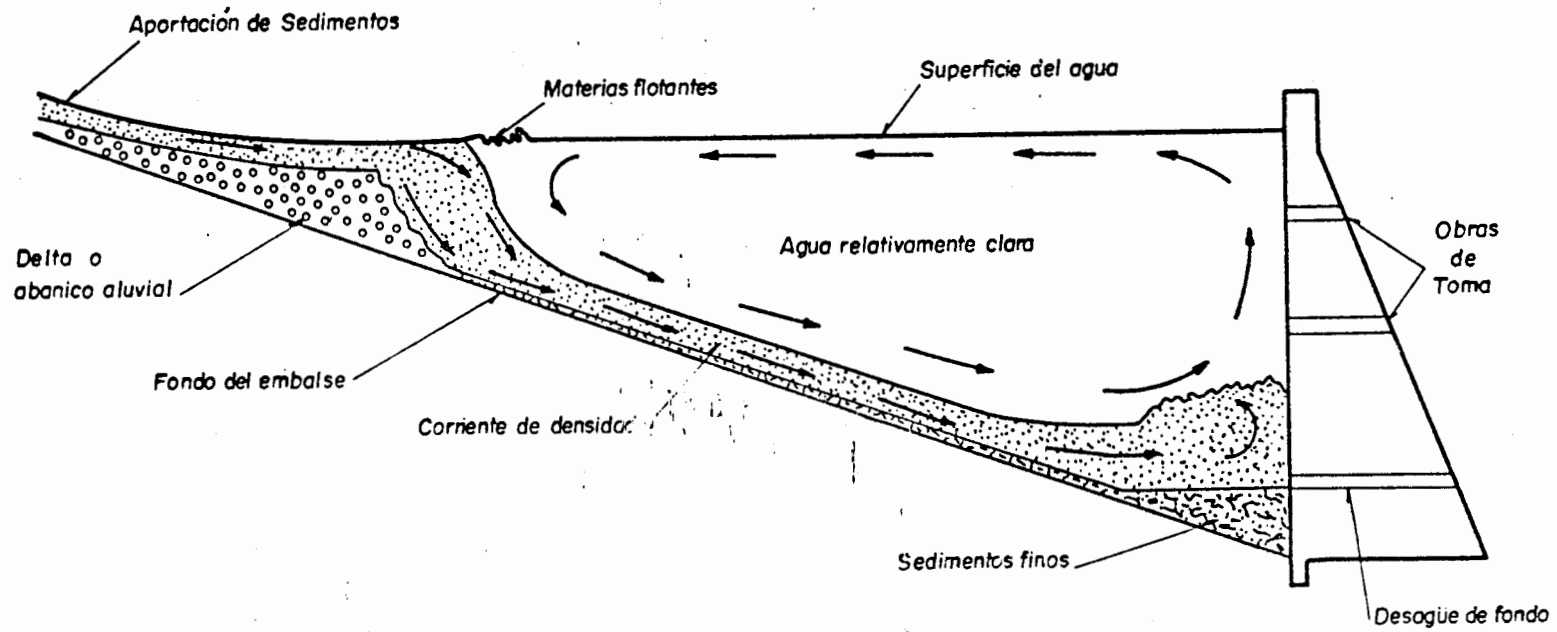
## 1.4 SEDIMENTACION EN LA ENTRADA AL EMBALSE.

Cuando una presa es contruida en una corriente para formar un almacenamiento, la velocidad del flujo se reduce y la mayor parte, o todo el sedimento transportado se depositará al llegar al vaso o sentir la influencia del remanso. Estos depósitos

\*ver inciso 3.3 del capítulo 7.

Fig. 1.1

# DISTRIBUCION TEORICA DE LOS SEDIMENTOS EN LOS EMBALSES



forman deltas o abanicos aluviales, los cuales elevan el fondo del cauce. Si tal elevación es importante, su mayor consecuencia será la reducción de la capacidad de conducción de los cauces aguas arriba del embalse, con los consecuentes desbordamientos, creándose frecuentemente o siempre, inundaciones, además se pueden empantanar esos terrenos y pueden quedar con el tiempo sepultadas aquellas estructuras construidas en esa zona, como diques, carreteras, puentes, etc.

En el inciso 4.2 del capítulo 7, será abordado con mayor detalle el problema de la sedimentación aguas arriba del embalse (delta).

## 1.5 DEGRADACION AGUAS ABAJO DEL EMBALSE.

### 1.5.1 INTRODUCCION.

Cuando una presa es construida en un río, el sedimento transportado por el cauce es parcialmente o totalmente atrapado por el embalse. Entonces, las descargas o las extracciones de la presa están constituidas por agua relativamente clara, la cual tiene una cierta capacidad de transporte, causando una degradación de la corriente inmediatamente aguas abajo de la estructura (28,1).

La magnitud de la degradación, depende del tipo de material y vegetación del cauce, de las características hidráulicas y de la concentración de sedimentos de las descargas.

Conforme las descargas avanzan hacia aguas abajo irán incrementando su transporte de sedimentos, hasta un punto en que se alcance un equilibrio entre las condiciones de flujo y el transporte de materiales (25,5).

Cuando los materiales de las orillas del cauce son resistentes a la erosión, la remoción del sedimento del fondo del cauce por el agua clara, consiste principalmente de partículas finas, originando que el fondo llegue a estar compuesto por los materiales más gruesos, en esta forma el cauce incrementa su área, y el fondo se acoraza, decreciendo entonces la velocidad del flujo hasta que un fondo estable alcanza el equilibrio (28,1).

En cauces con materiales en el fondo más resistentes que los que constituyen las orillas, la erosión de sus taludes y el meandro, pueden permitir alcanzar el equilibrio entre gasto líquido y transporte de sedimentos (25,5).

### 1.5.2 CONSECUENCIAS DE LA DEGRADACION AGUAS ABAJO DEL EMBALSE.

Se puede decir, que las degradaciones someras aguas abajo del embalse son deseables y benéficas, pues incrementan la capacidad de los cauces y mejoran el drenaje de las tierras adyacentes.

En cambio, en el caso de degradaciones severas se puede originar una socavación excesiva en las pilas de un puente, o bien, pueden abatirse los niveles freáticos, con los consecuentes daños a los terrenos agrícolas (25,5).

En el diseño de puentes y otras estructuras dentro del cauce y localizadas aguas abajo de un embalse, se tiene que considerar el descenso que sufrirá el fondo del cauce durante la vida útil de la obra, debido a su degradación por las descargas o extracciones de la presa (53,125).

### 1.5.3 CRITERIOS DE CALCULO.

A la fecha se cuenta con suficientes criterios para el cálculo de la magnitud de la degradación, cada método tiene sus hipótesis base, limitaciones y aplicabilidad debida al requerimiento de datos. Algunos de ellos pueden ser encontrados en las referencias 28, 53 y 85.

## 1.6 CONSECUENCIAS DE LA SEDIMENTACION DE LOS EMBALSES.

Los efectos de la sedimentación de los vasos, se pueden clasificar en dos grandes grupos, de acuerdo a la proximidad o lejanía de sus consecuencias o impactos, estos son:

1er. GRUPO: EFECTOS A CORTO Y MEDIANO PLAZO, entre ellos se tienen los siguientes problemas:

- a) de tipo TECNICO, como es el conocimiento de la distribución de los sedimentos para efectuar el proyecto de tomas y desagües (69,3). O bien, daños en el equipo mecánico como: válvulas, turbinas o compuertas.
- b) SANITARIOS, presentándose dos clases de problemas; los primeros relacionados con los deltas que pueden originar encharcamientos y favorecer la eutrofización\*, y aquellos debidos al incremento en el costo del tratamiento para abastecer de -- agua potable.
- c) de caracter ECOLOGICO, pues la proliferación de fitoplancton y la relativa escasez de especies piscícolas vegetarianas, son circunstancias que pueden dar lugar a grandes poblaciones de algas que reduzcan el nivel de oxígeno hasta límites no tolerados por la fauna (69,4).
- d) de efectos perjudiciales para los USOS RECREATIVOS, entre los cuales están la relación del embalse con la salubridad, el empobrecimiento de la fauna (pesca recreativa) y los depósitos de fango en las orillas que son ambientalmente lesivos.

2o. GRUPO: EFECTOS A LARGO PLAZO, definitivamente el problema más importante es la pérdida de capacidad del vaso, efecto que es el más obviamente considerable de la sedimentación a largo plazo y por tal, la causa principal de limitación de la vida -- económica de los embalses (69,4).

Diversos autores señalan otros tipos de problemas diferentes a los citados, entre ellos Borland, que destaca varios otros, directamente relacionados con la sedimentación del embalse, su discusión se puede encontrar en la ref.5, pág.20.

## 1.7 DISEÑO HIDROLOGICO CONSIDERANDO LA ACUMULACION DE SEDIMENTOS.

### 1.7.1 CONDICIONES DE DISEÑO.

Primeramente se debe de definir la denominada Vida Mínima Util del embalse, la -- cual nunca debe ser menor al período de amortización y puede considerarse igual -- a:

- a. menor o igual a 20 años, para pequeños almacenamientos.
- b. igual a 50 años, para medianos embalses.
- c. igual o mayor a 100 años, para grandes embalses.

Por otra parte, habrá que adoptar una consideración de estudio, esto es, se deberá de efectuar el diseño hidrológico del vaso, comúnmente por simulación (funcionamiento de vaso), asumiendo un volumen acumulado de sedimentos en un cierto tiempo. Por lo general, según las dos condiciones de diseño siguientes:

- 1a. Tomando en cuenta un porcentaje del 50% del volumen de sedimentos, que se acumularán al término de la vida útil del embalse.
- 2a. Tomando en cuenta el volumen total de sedimentos que se acumulará al finalizar la vida útil del embalse.

La primera condición trata de tomar en cuenta, que en toda la vida del vaso se estará utilizando a éste por defecto, ya que al no estar lleno de sedimentos como -- se está considerando, se tendrá una mayor capacidad de regulación, menores pérdidas por evaporación, etc.

\* consultar GLOSARIO (Anexo IV).



La segunda condición podría ser llamada "pesimista", sin embargo, se puede concluir que es a largo plazo, la mejor, por lo siguiente: se ha comprobado que la gran mayoría de los embalses siguen operando más allá de su vida útil y es posible en esta etapa cuando se alcanzan los mayores rendimientos de la regulación.

#### 1.7.2 ELEMENTOS PARA EL DISEÑO.

Se puede decir que son dos los cálculos indispensables sobre los sedimentos, para de ahí continuar con los diseños hidrológicos del vaso, obras de toma, conducciones, etc., éstos son:

- A. Estimación del volumen de sedimentos (S) que estará acumulado en el vaso al final de su vida útil.

Para realizar este cálculo, primeramente se debe estimar la aportación de sedimentos promedio anual de la cuenca del embalse (capítulo 4) y después, efectuar la simulación de la pérdida de capacidad debida a la sedimentación (capítulo 6, inciso 4), para de esta manera tomar en cuenta el evolución de la eficiencia de retención del embalse.

- B. En base al dato (S) anterior, se corregirán las curvas Elevaciones-Areas y Elevaciones-Volúmenes, con las técnicas presentadas en el capítulo 7, - inciso 4.1 .

Por último, con el gráfico anterior (Volúmenes-Areas) del vaso ya corregido por la sedimentación que se prevee, se inicia después, el diseño hidrológico del embalse.

Los bosques regulan el escurrimiento, reducen las avenidas y estabilizan los suelos. Por falta de bosque el escurrimiento superficial es intenso y da lugar a la erosión de los suelos.

H. BERESFORD-PEIRSE

## CAPITULO 2: IDEAS GENERALES SOBRE LA EROSION HIDRICA EN LA CUENCA.

### 2.1 TIPOS DE EROSION.

#### 2.1.1 DEFINICIONES.

El término EROSION proviene de latín "erodere", que significa desgaste, o hincarse. La erosión se puede definir de manera general, como el proceso geológico en virtud del cual los agentes del medio ambiente actúan sobre las rocas y suelos de un área, atacándolos hasta fragmentarlos, transportarlos y por último, depositarlos en otro lugar. Estos agentes o procesos son: la lluvia, el viento, los ríos, los glaciares, el mar y el hombre; originándose las erosiones HIDRICA, EOLICA, FLUVIAL, GLACIAL, MARINA y ANTROPICA (30,11)\*, respectivamente.

Específicamente se define a la erosión hídrica como el proceso de disgregación y transporte de las partículas del suelo por la acción del agua (47,163).

Además se definen los términos EROSION NORMAL o GEOLOGICA y EROSION ACELERADA. La erosión normal, es el desgaste de los terrenos en su ambiente natural. En cambio la erosión acelerada, es generalmente el resultado de la acción del hombre o de los animales, aunque ocasionalmente puede resultar de catástrofes naturales, como fuegos, deslaves, etc. (96,1).

La erosión normal es un proceso esencial, por el cual los suelos mantienen su profundidad, ya que la velocidad de erosión es bastante lenta, de quizás 2.5 cm. en 100 a 1,000 años (37,6) y en cambio la velocidad de formación del suelo, por la descomposición de las rocas base, es mayor, compensando así, las pérdidas y manteniendo el suelo.

---

\* Los números entre paréntesis corresponden, el primero a la clave de la referencia bibliográfica utilizada, y el segundo a la página que fue consultada.

2.1.2 EFECTO DE LAS ACTIVIDADES DEL HOMBRE EN LA MAGNITUD DE LA EROSION.

Las actividades humanas, tales como la remoción de la cobertura vegetal para la apertura de nuevas áreas al cultivo, las excavaciones para diferentes construcciones, la urbanización, las carreteras y sus trabajos accesorios, los bancos de grava y sus plantas de lavado, la minería, la eliminación de escorias, producen una pérdida de la protección vegetal en grandes áreas y constituyen nuevas fuentes de sedimentos, con las fatales consecuencias en la erosión y en la aportación de sedimentos.

2.2 CONSECUENCIAS DE LA EROSION HIDRICA.

Prácticamente en toda la superficie terrestre, exceptuando las regiones polares y los desiertos, el suelo está sujeto continuamente a la acción erosiva del agua, -- cuando no tiene una cubierta vegetal que el brinde protección durante las lluvias (19,5). Las lluvias incluso ligeras, disgregan el suelo desnudo y cuando son intensas, en terrenos de cultivo, con pendientes algo pronunciadas y sin medidas de protección, o en zonas deforestadas, gran cantidad de suelo enormemente valioso se -- pierde en poco tiempo, debido a la erosión.

Además, los problemas debidos a la erosión no se confinan al sitio donde se presenta, sino que sus efectos trascienden a otras áreas (27,5), así por ejemplo, al haber erosión del suelo el agua escurre turbia, dificultándose y reduciéndose la infiltración y por lo tanto, aumentando el escurrimiento, hasta el punto de ser mayores las avenidas; entonces, los tirantes en los cauces aumentan y el flujo tiene -- mayor capacidad de transporte de material sólido y más poder erosivo. Por último, -- la sedimentación del material erosionado en embalses y lagos, podría llegar a anular el almacenamiento en poco tiempo, debido a su magnitud.

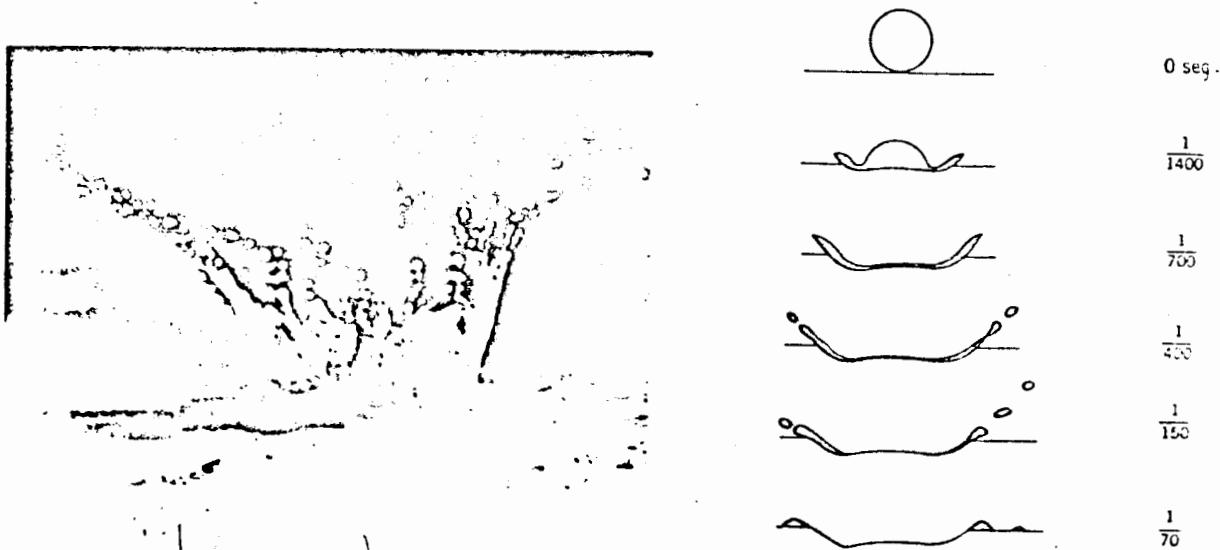
2.3 MECANISMO DE LA EROSION HIDRICA Y FACTORES QUE LO GOBIERNAN.

2.3.1 MECANISMO DE LA EROSION.

La acción o ataque del agua al terreno (suelo) se realiza SUPERFICIALMENTE, o en -- la PROFUNDIDAD DE SU PERFIL (22,39). En el primer caso las partículas del suelo -- son separadas y arrastradas "aisladamente" y en el segundo caso, "masivamente".

2.3.1.1 ATAQUE SUPERFICIAL. Este mecanismo presenta dos acciones: la DISGREGACION -- y el TRANSPORTE, debidas ambas, a la lluvia y al escurrimiento.

En ausencia de obstáculos las gotas de lluvia golpean en suelo con considerable -- energía, disgregando las partículas terrosas y proyectándolas al aire (ver Figs. -- 2.1 siguientes).

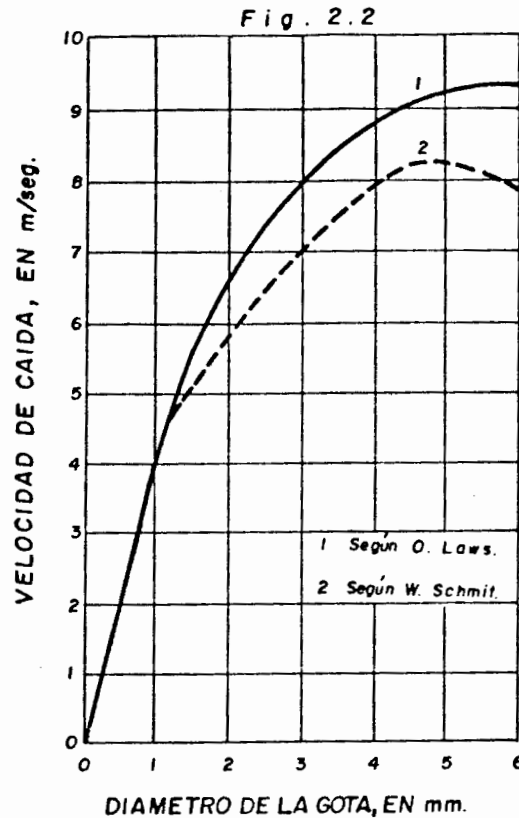


El transporte por la lluvia es lo que W.D. Ellison (1944) llamó: Erosión por SALPICADURA.

La energía de las gotas de lluvia es dinámica y por lo tanto, su determinación exige el conocimiento del tamaño y velocidad terminal de caída. O.J. Laws y D.A. Parson (1943) encontraron una relación entre la intensidad de la lluvia (I), en mm/hr. y el tamaño medio (D) de las gotas (60,1), ésta es:

$$D = 4.018 (I)^{0.182} \quad (2.1)$$

Adicionalmente, los autores presentaron la Fig. 2.2 siguiente, para determinar la velocidad terminal de las gotas en función del tamaño de éstas (47,167).



Respecto al transporte por escurrimiento, éste es mucho más importante, pues, al deslizarse el agua sobre el terreno se originan turbulencias que son capaces de poner en suspensión las partículas del suelo, o bien, de arrastrarlas rodando o en saltación.

2.3.1.2 ACCION EN PROFUNDIDAD. La saturación del suelo, es una circunstancia favorable a los movimientos en "masa", pues los terrenos con pendientes pronunciadas y no "sujetos" por la vegetación, se deslizan fácilmente, o bien, aunque exista vegetación, si se tiene un estrato impermeable que las raíces no penetran y el cual es lubricado por el agua que se infiltró, favorecerá éste el deslizamiento.

2.3.2 INFLUENCIA DE LOS PRINCIPALES FACTORES EN LA EROSION.

Los principales factores que determinan la magnitud del proceso erosivo, son: la precipitación, la cobertura vegetal, el tipo de suelo, la fisiografía, el uso del terreno y las prácticas antierosivas.

PRECIPITACION: El tipo (convectiva, orográfica o ciclónica), la intensidad, su duración y su período de retorno, son las características de mayor influencia en el proceso erosivo.

Cuando su intensidad es mayor que la velocidad de infiltración, se generará escurrimiento, factor fundamental en la erosión.

**COBERTURA VEGETAL:** La influencia que la vegetación tiene para reducir o aminorar el proceso erosivo, se puede englobar en las tres siguientes acciones (35,11):

- 1a. Protege al suelo de la percusión de las gotas de lluvia y por lo tanto, reduce notablemente la disgregación y transporte por salpicadura.
- 2a. Aumenta la capacidad de infiltración del suelo, disminuyendo o anulando el escurrimiento, así como los efectos de éste.
- 3a. Como resultado del entrelazamiento de las raíces, el suelo presenta una mayor consistencia, según la naturaleza de la vegetación.

**SUELO:** La textura, estructura y composición mineralógica son propiedades que determinan el tamaño de las partículas y por consiguiente, su facilidad a ser disgregadas y arrastradas por la lluvia y el escurrimiento, este último, influido por la porosidad y la capacidad de infiltración del suelo.

**FISIOGRAFIA:** El efecto de la erosión hídrica, prácticamente no existe en terrenos horizontales, debido a la compensación mutua en el transporte por salpicadura y a la anulación del escurrimiento.

De lo anterior, se deduce la importancia de la pendiente del terreno, misma que va asociada a su longitud de desarrollo, pues entre más grande es el recorrido, mayor es la cantidad de material factible de ser erosionado. Otra característica a tomarse en cuenta es la curvatura del relieve: convexa, plana o cóncava (105,1).

**USO DEL TERRENO Y PRACTICAS DE CONSERVACION:** La influencia de todos estos factores será discutida con más detalle en el capítulo 10.

## 2.4 FORMAS DE EROSION EN EL TERRENO.

Los dos tipos de ataques del agua al terreno, definen dos formas de erosión (ver Fig. 2.3 de la página siguiente), éstas son:

### I. EROSION EN LA SUPERFICIE.

### II. EROSION EN EL PERFIL.

#### 2.4.1 FORMAS DE EROSION EN LA SUPERFICIE.

**2.4.1.1 EROSION LAMINAR.** Es la remoción más o menos uniforme en toda la superficie, de una capa o lámina delgada de suelo (19,25).

La disgregación por lluvia y el transporte por escurrimiento son vitales en la formación de un flujo homogéneo en el espacio; esta mezcla tierra-agua baja como lámina por el suelo, el cual se va degradando en capas sucesivas. Este tipo de erosión es menos evidente y espectacular, que por ejemplo, la erosión en cárcavas, sin embargo, en volumen de suelo perdido aporta comúnmente mucho mayor cantidad de sedimentos a los cauces (ver capítulo 5, inciso 2.2).

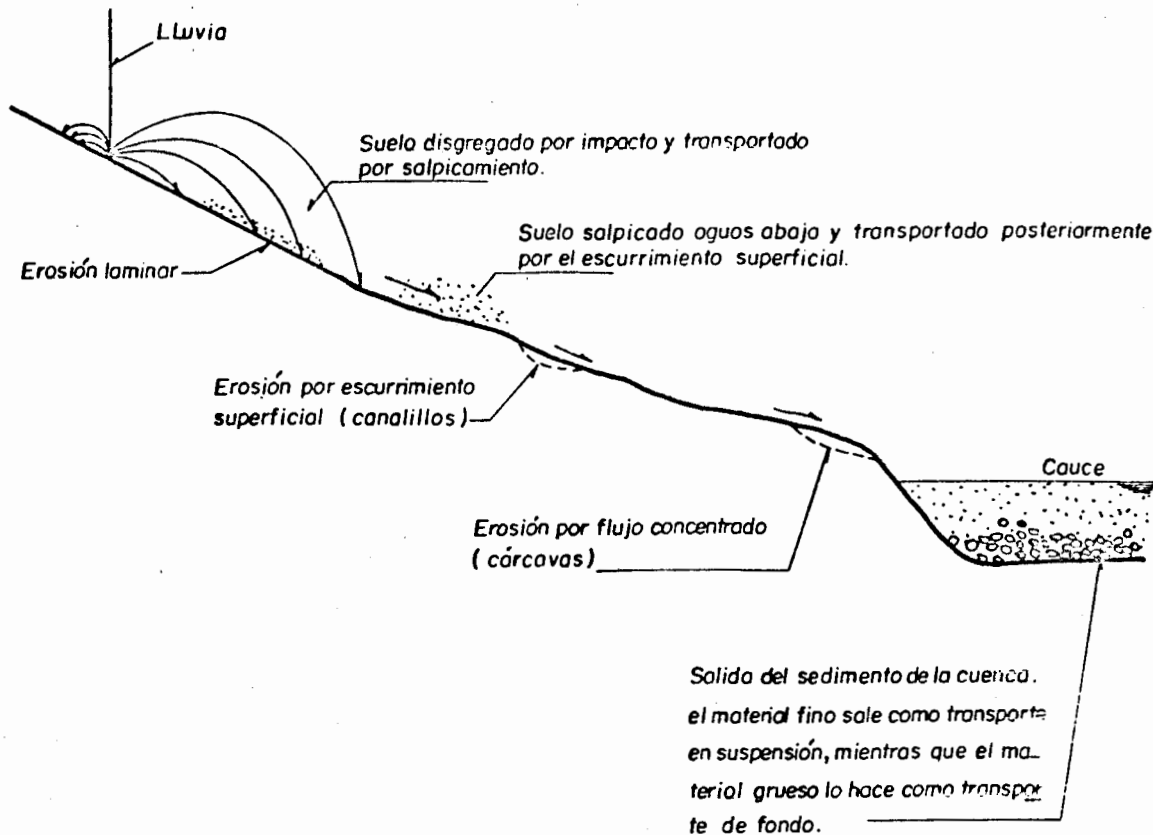
**2.4.1.2 EROSION EN CANALILLOS (o pequeños surcos).** La superficie de las áreas de cultivo en general no son lisas ni con pendiente uniforme, por lo que la erosión laminar no se presenta continuamente, sino que el agua de lluvia al escurrir se concentra en las depresiones y fluye adoptando la trayectoria mínima de resistencia y forma así pequeños surcos o canalillos en el terreno.

El número de canalillos que se forman en una superficie específica, varía ampliamente, dependiendo de la irregularidad del terreno y de la cantidad y velocidad del escurrimiento (19,28).

Se acepta que la erosión laminar favorece notoriamente la formación de los pequeños surcos, debido al arrastre de las partículas finas y la permanencia de los -

Fig. 2.3

## PROCESO DE EROSION Y TRANSPORTE EN LA CUENCA



elementos gruesos que influirán en la formación de irregularidades (depressiones y elevaciones).

Aunque esta forma de erosión es bastante peligrosa, por ser muy evidente en presencia, se puede actuar inmediatamente para combatirla.

**2.4.1.3 EROSION EN CARCAVAS.** La erosión en cárcavas se origina después de las erosiones laminar y en canalillos y ocurre cuando el escurrimiento en un declive se concentra y aumenta considerablemente su velocidad y volumen; con frecuencia se forman cárcavas a partir de depresiones naturales.

El escurrimiento debe de tener la energía suficiente para desprender y transportar grandes cantidades de suelo. Lo anterior dependerá de la extensión de cuenca de cada cárcava y de las características de generación de tales flujos.

Debido a la naturaleza, de la formación de las cárcavas, generalmente son incluidas dentro de la erosión de los cauces, conjuntamente con la erosión de las orillas, la socavación del fondo, la degradación de las planicies de inundación, etc. (81,3-2).

**2.4.1.4 CORRIENTES DE LODO.** Durante las fuertes lluvias la capa superior del suelo absorbe gran cantidad de agua y entonces, si tal suelo no está bien sujeto -- por la vegetación, la masa de tierra superficial puede transformarse en una mezcla agua sedimento, capaz de deslizarse hacia las partes bajas (22,65).

### 2.4.2 FORMAS DE EROSION EN EL PERFIL.

Estas comprenden en síntesis las siguientes tres formas:

**2.4.2.1 DESLIZAMIENTOS.** Ya descritos en el inciso 2.3.1.2 anterior.

2.4.2.2 CAVERNAS Y HUNDIMIENTOS. La formación de flujos subterráneos, puede originar cavernas, que se manifiestan por hundimientos, o también por deslizamientos.

2.4.2.3 REPTACION DEL SUELO. Condición muy parecida a las corrientes de lodo, - pero a mayor escala.

## 2.5 PERDIDA DE SUELO: DAÑOS Y CRITERIOS DE EVALUACION.

### 2.5.1 EFECTOS PERJUDICIALES.

El suelo que se pierde por erosión acelerada en terrenos de cultivo, es generalmente el más fértil, es decir, el que contiene los elementos nutritivos para las plantas, el humus y los fertilizantes adicionados. Además de los efectos perjudiciales anteriores, se tienen otros problemas relacionados con la pérdida de suelo, estos son:

- a) Reducción de la velocidad de infiltración y del volumen infiltrado (inciso -- 2.2 anterior).
- b) Aportación del material erosionado a los cauces, con las infinitas consecuencias ya bosquejadas.
- c) Depositación del material erosionado en suelos fértiles, reduciendo la productividad y dañando o destruyendo los cultivos o su vegetación natural (3,16).
- d) Deterioración de la estructura del suelo: al tratar de reponer el suelo perdido, es necesario disponer de una parte del subsuelo, el cual tiene casi siempre peor estructura.
- e) Mayor energía requerida para la labranza del terreno, lo anterior, debido a la dificultad que presenta el subsuelo para ser arado.
- f) División del campo por las cárcavas, que resulta en un mayor tiempo y costo para la producción.

Con todo lo anterior se pone de manifiesto la necesidad permanente de detección de las áreas con peligro de erosión o ya bajo su acción, la cuantificación o evaluación de las pérdidas de suelo, la proposición de medidas para combatirla y su puesta en práctica en todos los niveles (cuenca, región o área específica).

### 2.5.2 METODOS DE EVALUACION.

En la actualidad todos los métodos de que se dispone para la cuantificación de la pérdida de suelo, son de tipo empírico y pueden ser agrupados como sigue:

- 1o. Valores, Tablas o Gráficas del orden de magnitud de la erosión para - diversas zonas o áreas.
- 2o. Ecuaciones de Regresión Estadística. Dentro de este grupo están las - fórmulas de C.W. Musgrave 1947 (59,1) y sus modificaciones (r,1) y la ecuación de W.H. Wischmeier y D.D. Smith, conocida como Fórmula Unisal de Pérdida de Suelo (97,4).
- 3o. Modelos Matemáticos. Los cuales pretenden simular el mecanismo de la erosión, entre ellos se encuentran el de L.D. Meyer, 1971 (o,4) y el de G.R. Foster y L.D. Meyer, 1972 (e,1), entre otros.

## 2.6 SEDIMENTACION DEL MATERIAL EROSIONADO.

### 2.6.1 INTRODUCCION.

La mayor parte del sedimento transportado por los ríos y depositado en los propios cauces, deltas, embalses, u otras obras civiles y que constituye un medio de polución de las aguas, procede (fue erosionado) de sus cuencas tributarias (- 78,1).

Durante este transporte, la distancia que recorren las partículas depende princi

palmente de su tamaño, densidad, forma y de la velocidad del flujo, debido a esto el material erosionado puede ser depositado en alguno de los sitios siguientes:

- A. Próximo a su lugar de origen.
- B. Por último, en el mar.
- C. En cualquier otro punto intermedio entre los dos anteriores.

Se puede decir, que sólo el sitio C, origina los problemas más graves por sedimentación de los materiales erosionados.

#### 2.6.2 DAÑOS CAUSADOS POR LA SEDIMENTACION.

Los daños que principalmente causa la sedimentación aguas abajo de su punto de origen, se pueden agrupar en cinco tipos principales (4,6):

- 1o. Sedimentación en cauces, canales y sistemas de drenaje.
- 2o. Sedimentación de embalses y otras obras civiles.
- 3o. Daños a equipos mecánicos, hidráulicos, etc.
- 4o. Depósito en tierras bajas ribereñas.
- 5o. Problemas de polución de las aguas.



El deseo de conocimiento,  
como la sed de riqueza,  
aumenta a medida que se  
va adquiriendo.

LAURENCE STERNE

### CAPITULO 3: METODOLOGIA PROPUESTA PARA LA ESTIMACION DE LA CAPACIDAD REQUERIDA PARA SEDIMENTOS (Exposición General).

#### 3.1 GENERALIDADES.

Todos los ríos en su incansable búsqueda del perfil de equilibrio de su cauce, - sufrirán una violenta modificación en sus condiciones naturales al construirse - en ellos un embalse (69,2)\*. Ya que por ejemplo, cuando una presa es construida en un cauce para formar un almacenamiento, la velocidad del flujo se reduce notablemente al llegar al vaso y el sedimento transportado por el río inicia su deposición, comenzando así el proceso denominado: SEDIMENTACION DEL EMBALSE.

La estimación de la magnitud de la sedimentación y de las cantidades y localización de las acumulaciones de sedimento, son requeridas por los ingenieros que desarrollan el diseño del embalse, porque la presencia de los sedimentos determina la capacidad útil de almacenamiento, las elevaciones de las tomas, las posibilidades de usos recreativos, etc.

La magnitud de la sedimentación de los embalses depende de muchos factores interrelacionados, que ya fueron citados en el capítulo 1, sin embargo, conviene resaltar que la sedimentación es especialmente drástica en almacenamientos que son "pequeños" en relación al escurrimiento del río, esto es, embalses cuyo cociente entre su capacidad total y el volumen de escurrimiento medio anual, sea menor -- que la unidad (48,3).

#### 3.2 CLASIFICACION DE LOS METODOS DE ESTIMACION DE LA APORTACION DE SEDIMENTOS.

Los procesos de erosión, transporte y depositación de los sedimentos en el embalse son bastante complejos y por tal, todavía no existen métodos de cálculo -- confiables y únicos, sino que por el contrario, la mayoría de los criterios son empíricos y en general, la estimación de la aportación de sedimentos por la cuen

\* Estos números indican la referencia bibliográfica empleada y su página consultada.

ca a un embalse, es llevada a cabo empleando uno o más de los métodos asequibles según los datos disponibles.

Los criterios disponibles para la estimación de la aportación de sedimentos, serán clasificados en 7 grupos, según el tipo de información que utilizan y la confiabilidad de sus resultados, en orden DECRECIENTE estos son:

1er. GRUPO: METODOS QUE UTILIZAN LOS DATOS DEL MUESTREO DE SEDIMENTOS.

En este grupo se pueden considerar enmarcados dos tipos especiales de métodos, - estos son:

- A. MODELOS DE SIMULACION. La aportación de sedimentos está estrechamente relacionada con los escurrimientos de un cauce, por lo tanto, la confiabilidad de un modelo de simulación de sedimentos, es dependiente de su complemento: el modelo de simulación de escurrimientos (78,19). Por otra parte, las técnicas de simulación son - en realidad modelos paramétricos de tránsito o transporte, ya sea del flujo o de los sedimentos, éste es el caso del Modelo Stan---ford IV, que es muy popular. Para mayores detalles sobre el tema y en especial sobre el modelo anterior, se sugiere consultar la ref. recomendada a.
- B. METODOS DE PROCESAMIENTO DE LOS DATOS. Uno de estos criterios, quizás el más recomendable, es el llamado: Método de la Curva de Rango de Sedimentos-Duración del Flujo (85,2 y 41,4).

2o. GRUPO: METODOS QUE EMPLEAN ESCASOS DATOS DEL MUESTREO DE SEDIMENTOS, O LA INFORMACION SOBRE LOS MATERIALES DE QUE ESTA FORMADO EL CAUCE.

Dentro de este grupo quedarán englobados todos los métodos o fórmulas para estimar los distintos tipos de transporte de sedimentos, de la Hidráulica Fluvial (- ver las referencias recomendadas b, ch, n, v, x, z).

3er. GRUPO: METODOS QUE PERMITEN EMPLEAR LA INFORMACION HIDROMETRICA.

Formando este grupo se encuentran los llamados: Métodos Estocásticos, uno de los cuales (78,49) será expuesto posteriormente (capítulo 4).

4o. GRUPO: METODOS QUE SE BASAN EN LA MEDICION DE LOS SEDIMENTOS DEPOSITADOS EN EMBALSES.

La medición del sedimento acumulado en los embalses de edad e historia conoci---das, son excelentes datos para inferir la magnitud de la aportación de sedimen---tos. La cantidad de sedimento acumulado debe ser dividida entre la eficiencia de retención promedio del embalse (capítulo 6); para obtener la aportación de sedi---mentos de tal cuenca (81,4-2). Lo anterior toma en cuenta la cantidad de materia---les que pasaron a través del vaso.

La medición de la depositación, en un cierto número de almacenamientos de una determinada región o cuenca, son frecuentemente utilizadas, por ejemplo, para encontrar alguna relación entre la aportación de sedimentos y el tamaño de la cuenca. En las referencias recomendadas j, l y u, se pueden encontrar con bastante detalle las técnicas de medición de los sedimentos (batimetrías) en los embalses.

5o. GRUPO: METODOS BASADOS EN EL COEFICIENTE DE ENTREGA DE SEDIMENTOS.

En este criterio se define como EROSION TOTAL de una cuenca o área determinada, la suma de todas las erosiones que tienen lugar, como son: erosión laminar y en canalillos, en cárcavas y todos los tipos de erosión del cauce (de las orillas, - del fondo y de sus planicies de inundación). Por otra parte, se define como COE---FICIENTE DE ENTREGA DE SEDIMENTOS al cociente entre la aportación de sedimentos de la cuenca (incógnita) y su erosión total, para el mismo período.

El coeficiente de entrega de sedimentos siempre es MENOR a la unidad y puede ser estimado a partir de relaciones empíricas (Anexo III).

### 6o. GRUPO: METODOS EMPIRICOS.

Dentro de estos criterios, existen un gran número de fórmulas, tablas y gráficas de carácter empírico, que permiten efectuar una estimación muy rápida de la aportación de sedimentos de una cuenca. Desafortunadamente, estos métodos por su propia naturaleza, sólo deben de ser utilizados para tener una idea del orden de magnitud del valor buscado, o bien, para acotarlo.

### 7o. GRUPO: METODO DE COMPARACION DE CUENCAS.

La estimación de la aportación de sedimentos de una cuenca, puede llevarse a cabo en base a la inspección en campo de sus características generales y entonces, compararla con otras cuencas o áreas en las cuales se conozcan sus aportaciones de materiales sólidos, y cuyas condiciones fisiográficas, climáticas e hidrológicas sean similares a las de la cuenca bajo estudio (5,1).

Se podrá adoptar para el valor de la aportación de sedimentos de la cuenca bajo estudio, el valor promedio de los obtenidos en las cuencas similares, o seleccionar otra magnitud a criterio.

La aportación de sedimentos de una cuenca bajo estudio, puede ser estimada a partir del valor calculado en otra cuenca, siempre y cuando ambas pertenezcan a la misma región y sus características físicas (topografía, suelos, vegetación, uso del terreno, etc.) sean similares, como ya se indicó; pero además, la relación de áreas de drenaje debe ser la siguiente: el tamaño de la cuenca en la que la magnitud de la aportación de sedimentos es conocida, no debe de ser menor de la mitad, ni mayor del doble del tamaño de la cuenca en estudio, es decir, aquélla para la cual se requiere la inferencia (81,4-2). Si lo anterior se cumple, entonces:

$$AS_2 = AS_1 (A_2/A_1)^{0.80} \quad (3.1)$$

siendo:

$AS_2$  = aportación de sedimentos en la cuenca en estudio (inferencia), en Ton/Km<sup>2</sup>/año. o en m<sup>3</sup>/Km<sup>2</sup>./año.

$AS_1$  = aportación de sedimentos conocida en otra cuenca, en Ton/Km<sup>2</sup>./año o en m<sup>3</sup>/Km<sup>2</sup>./año.

$A_2$  = área de drenaje de la cuenca bajo estudio, en Km<sup>2</sup>.

$A_1$  = área de drenaje de la cuenca utilizada para la inferencia, en Km<sup>2</sup>.

## 3.3 SINTESIS DE LA METODOLOGIA PROPUESTA.

### 3.3.1 NOTA IMPORTANTE.

La metodología que se presenta para realizar un estudio sobre la sedimentación de un embalse, está orientada a los casos en los que NO se dispone de datos del muestreo de sedimentos ni de información sobre los materiales del cauce, situación bastante común cuando se diseñan hidrológicamente pequeños y medianos embalses. Circunstancia que por otra parte, es bastante frecuente debido al desarrollo de nuestro país.

### 3.3.2 INTRODUCCION.

El estudio de la sedimentación de un embalse con vistas a diseñar la capacidad requerida para los sedimentos, consiste de los análisis básicos citados en el "Objetivo del trabajo", al inicio de éste.

Por otra parte, dentro del estudio de sedimentación de un vaso, se deben de proponer medidas prácticas para reducir la depositación, entonces un análisis adicional se tendrá que incluir en todo estudio de este tipo, este punto está relacionado con las llamadas MEDIDAS CONTRA LA EROSION (capítulo 10).

A continuación se describen brevemente cada uno de los puntos o análisis citados anteriormente.

### 3.3.3 DESCRIPCION DE LOS ANALISIS NECESARIOS.

3.3.3.1 EVALUACION DE LA APORTACION DE SEDIMENTOS. Los tipos o formas en que los cauces transportan el material sólido se pueden clasificar según dos criterios, como se ilustra en la Fig. 3.1 siguiente (z,14).

Fig. 3.1

		SISTEMA DE CLASIFICACION	
		BASADO EN EL MECANISMO DE TRANSPORTE	BASADO EN EL TAMAÑO DE LAS PARTICULAS
TRANSPORTE TOTAL DE SEDIMENTOS	TRANSPORTE DE LAVADO	TRANSPORTE EN SUSPENSION	TRANSPORTE DE LAVADO
	TRANSPORTE DE MATERIAL DEL FONDO EN SUSPENSION		TRANSPORTE DE MATERIAL DEL FONDO
	TRANSPORTE DE FONDO	TRANSPORTE DE FONDO	

Sin embargo, se puede decir sucintamente que el material sólido es transportado por los cauces, en suspensión y rodando o deslizándose, como transporte de fondo.

La forma óptima de valuar tales transportes es a partir de los registros del muestreo de tales sedimentos. Desafortunadamente, el transporte de fondo es normalmente bastante difícil de muestrear, estimándose su cantidad por medio de los criterios de la Hidráulica Fluvial o a criterio, como un porcentaje del transporte en suspensión (41,3).

Cuando no existen datos del muestreo de sedimentos en las corrientes que afluyen al vaso, se pueden aplicar cualquiera de los otros criterios descritos (inciso 3.2 anterior).

Dentro de la metodología que se presenta, la evaluación de la aportación de sedimentos de la cuenca, se basará en los métodos del 3o., 5o. y 6o. grupos ya delineados.

3.3.3.2 DETERMINACION DEL PESO ESPECIFICO DE LOS SEDIMENTOS DEPOSITADOS. El peso específico de los materiales depositados en un embalse está sujeto a cambios debidos a su progresiva consolidación (79,754); además, los resultados de la evaluación de la aportación de sedimentos son obtenidos en unidades de peso por tiempo, por lo que es necesario determinar el peso volumétrico de los materiales sólidos que se depositarán en el vaso, al término de un cierto número de años y poder definir el volumen que ocuparán.

3.3.3.3 ESTIMACION DE LA EFICIENCIA DE RETENCION DEL EMBALSE. La eficiencia de retención representa un porcentaje del sedimento que entra o llega al vaso, el cual es depositado y retenido por el embalse. En grandes embalses la eficiencia de retención frecuentemente es cercana al 100% y no así en pequeños almacenamien

tos. La estimación de la eficiencia de retención es de vital importancia sobre todo en el estudio de la simulación de la pérdida de capacidad del vaso debida a la sedimentación (inciso 4 del capítulo 6).

3.3.3.4 PREDICCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS SEDIMENTOS EN EL EMBALSE. El estudio de la distribución de los sedimentos en el vaso es un problema complejo, debido a los numerosos factores que son involucrados en el proceso. Al parecer los métodos más aceptados para la predicción de tal distribución son los empíricos, por ejemplo, los llamados : Método Area-Incremento y Método Area-Reducción (6,7).

3.3.3.5 MEDIDAS PROPUESTAS CONTRA LA SEDIMENTACION DE LOS EMBALSES. Desde un punto de vista muy general, existen dos prácticas o medidas contra la sedimentación de los embalses, éstas son: la corrección de los torrentes y la reforestación o repoblación forestal; la primera tiene una eficacia inmediata pero efímera y en cambio la segunda, presenta un impacto a largo plazo pero imperecedero (64,2).

Para los casos en los que se prevea una vida muy corta del embalse, debido a la sedimentación, se deben de estudiar diversas alternativas para reducir la magnitud de la aportación de sedimentos al vaso (ver capítulo 9).

El hombre que no comete errores,  
generalmente no hace nada.

E.J. HELPS

## CAPITULO 4: EVALUACION DE LA APORTACION DE SEDIMENTOS DE LA CUENCA.

### 4.1 DEFINICIONES.

Como se citó en el capítulo anterior, la EROSION TOTAL es la cantidad total de material erosionado en la cuenca, incluyendo las pérdidas de suelo (erosión laminar, en canalillos y en cárcavas), las socavaciones del cauce (erosión de sus orillas, del fondo y de sus planicies de inundación) y todas las otras fuentes de sedimentos de tal cuenca o área específica. Ahora bien, de la totalidad de los materiales erosionados, no todos llegan a los cauces y no todos son transportados por ellos, debido a lo cual, la cantidad de material sólido aportado por una cuenca, siempre es menor que el valor de su erosión total. De acuerdo a lo anterior, se definen los términos siguientes:

**APORTACION DE SEDIMENTOS:** cantidad total del material erosionado que será aportado aguas abajo a un punto de interés (un embalse, el mar, un puerto, etc.), durante un cierto lapso (comúnmente un año) por la cuenca. Expresándose generalmente en -- Ton/año, o bien, en m<sup>3</sup>/año.

**MAGNITUD DE PRODUCCION DE SEDIMENTOS o DEGRADACION ESPECIFICA:** es la aportación de sedimentos por unidad de área. Entonces, se divide la aportación de materiales sólidos (previamente definida), entre la magnitud de cuenca. Reportándose comúnmente en Ton/Km<sup>2</sup> /año, o en, m<sup>3</sup>/Km<sup>2</sup> /año.

En la práctica las dos definiciones presentadas se consideran sinónimas.

**COEFICIENTE DE ENTREGA DE SEDIMENTOS o COEFICIENTE DE APORTACION DE SEDIMENTOS:** es la relación entre la aportación de sedimentos y la erosión total de la cuenca. Es una cantidad adimensional, y por lo regular se le expresa en porcentaje, y lógicamente siempre es menor del 100%.

### 4.2 FACTORES QUE AFECTAN LA MAGNITUD DE LA APORTACION DE SEDIMENTOS.

El estudio del mecanismo de la erosión hídrica y de las formas que define en el terreno (capítulo 2), han puesto de manifiesto cuáles son los factores que controlan el fenómeno, mismos que aunados a otros, regirán la magnitud de la aportación de sedimentos de una determinada cuenca.

L.D. Baver (1965) resume en cuatro grupos básicos todos los factores que afectan a la erosión (39,7)\*, estos son:

$$\text{EROSION} = \Phi (C_L, T, V_c, S, H) \quad (4.1)$$

siendo:

$C_L$  = factores debidos al clima.

T = factores debidos a la topografía.

$V_c$  = factores debidos a la cobertura vegetal.

S = factores debidos al suelo.

H = factores debidos al hombre.

Con respecto a la aportación de sedimentos de una cuenca, su magnitud está influenciada por otros factores y los anteriores, entre los primeros se pueden citar:

- a. Tamaño de la cuenca.
- b. Otras características topográficas de la cuenca, como son: forma, pendiente promedio, tipo de orografía, densidad de drenaje, etc.
- c. Magnitud y características del escurrimiento.
- d. Textura y granulometría de los sedimentos.

#### 4.3 CRITERIOS EMPIRICOS DE ESTIMACION DE LA APORTACION DE SEDIMENTOS.

##### 4.3.1 INTRODUCCION.

Por lo general, el gravísimo inconveniente de los criterios empíricos, es que su aplicación a cuencas o zonas diferentes a aquéllas en las que fueron deducidos puede conducir, en algunos casos, a muy graves errores (10,9). La ventaja principal de su utilización, radica en su facilidad de aplicación y en la rapidez con la cual se puede efectuar una estimación de la aportación de sedimentos de una cuenca.

NOTA: Todos los criterios empíricos, serán siempre presentados en orden creciente de su posible confiabilidad o garantía de sus resultados.

##### 4.3.2 ORDENES DE MAGNITUD EN BASE A MEDICIONES EN EMBALSES, EN DIVERSOS PAISES.

###### AUSTRIA.

En Austria se han encontrado los siguientes valores para 9 embalses pequeños y medianos (66,3), cuyo rango de áreas de cuenca fue de 28 a 195 Km<sup>2</sup> y capacidades variando entre 0.24 y 87 Hm<sup>3</sup>:

Aportación de Sedimentos Promedio:	569	m <sup>3</sup> /Km <sup>2</sup> /año.
Máxima Aportación de Sedimentos:	1,040	m <sup>3</sup> /Km <sup>2</sup> /año.
Mínima Aportación de Sedimentos:	60	m <sup>3</sup> /Km <sup>2</sup> /año.

###### INDIA.

Por otra parte, las mediciones de 10 embalses en la India, con áreas de cuenca fluctuando entre 6,133 y 83,398 Km<sup>2</sup> y capacidades totales entre 608 y 9,667 --- Hm<sup>3</sup>., conducen a los resultados siguientes (58,18):

Aportación de Sedimentos Promedio:	818	m <sup>3</sup> /Km <sup>2</sup> /año.
Máxima Aportación de Sedimentos:	1,816	m <sup>3</sup> /Km <sup>2</sup> /año.
Mínima Aportación de Sedimentos:	252	m <sup>3</sup> /Km <sup>2</sup> /año.

\* Estos números corresponden a la referencia utilizada y a su página consultada.



Pérdida Promedio Anual de capacidad por los embalses: 0.60% (con máxima de 1.40% y mínima de 0.10%).

#### ESPAÑA.

Las mediciones realizadas en 18 embalses españoles, con áreas de cuenca comprendidas entre 10 y 6,300 Km<sup>2</sup> y cuyas capacidades totales variaron desde 4 a 891 Hm<sup>3</sup>., condujeron a las siguientes conclusiones generales (73,7):

Aportación de Sedimentos Promedio: 300 m<sup>3</sup>/Km<sup>2</sup>/año.  
 Máxima Aportación de Sedimentos: 1,420 m<sup>3</sup>/Km<sup>2</sup>/año.  
 Mínima Aportación de Sedimentos: 48 m<sup>3</sup>/Km<sup>2</sup>/año.

Pérdida Promedio Anual de capacidad por los embalses: 0.50% (con máxima de 6.53% y mínima de 0.15%).

#### U.S.A.

En U.S.A., se tienen a la fecha del orden de 1,100 mediciones en embalses (98,-47), a partir del resumen presentado en la referencia 94, páginas 83 y 84, para 66 embalses distribuidos en 7 regiones geográficas, se condensaron los valores de la TABLA 4.1 de la página siguiente.

NOTA: Todos los valores anteriores son totalmente orientativos y no deben ser utilizados para diseño, sólo fueron seleccionados por proceder de países con características climáticas, hidrológicas y morfológicas, algo semejantes con las de nuestro país.

#### 4.3.3 TABLAS DE VALORES EMPIRICOS DE LA APORTACION DE SEDIMENTOS.

En las tablas empíricas de producciones de sedimentos, sus valores concentrados son cantidades medias encontradas en una determinada zona o área y están relacionadas con ciertas características de la cuenca, fácilmente asequibles.

En la TABLA 4.2 siguiente, se concentran unos valores promedio generales para diversos tamaños de cuenca, encontrados en U.S.A. (25,12).

TABLA 4.2  
 VARIACION DE LA APORTACION DE SEDIMENTOS  
 CON EL TAMAÑO DE CUENCA, EN U.S.A.

RANGO DE TAMAÑOS DE CUENCA, EN Km <sup>2</sup>	NUMERO DE MEDICIONES	APORTACION DE SEDIMENTOS MEDIA, EN m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> /año
< 25.9	650	1,810.0
25.9 o 259.0	205	762.0
259.0 o 2,590.0	123	481.0
> 2,590.0	118	238.0

Por otra parte, en la TABLA 4.3 de la página número , se tienen las magnitudes o valores típicos obtenidos a partir de más de 11,000 mediciones de la sedimentación ocurrida en los embalses de U.S.A. (98,48).

#### 4.3.4 GRAFICAS EMPIRICAS DE MAGNITUDES DE LA APORTACION DE SEDIMENTOS.

Se ha intentado encontrar relaciones sencillas entre ciertas características -- climáticas o topográficas y la aportación de sedimentos. Entre los factores que



TABLA 4.1  
**APORTACION DE SEDIMENTOS PARA CUENCAS MENORES A 259 Km<sup>2</sup> (100mi<sup>2</sup>) DE U.S.A., EN Ton / Km<sup>2</sup>/año**  
 ( FUENTE : U. S. WATER RESOURCES COUNCIL, 1968 )

REGION	APORTACION DE SEDIMENTOS ESTIMADA			REGION	APORTACION DE SEDIMENTOS ESTIMADA		
	Máx.	Prom.	Mín.		Móx	Prom.	Mín
TEXAS Y GOLFO	1,114	630	32	GRANDE CUENCAS	623	140	35
RIO GRANDE	1,170	455	53	MISSOURI	2,347	525	4
COLORADO SUR	567	210	53	TENNESSEE	546	245	161
CALIFORNIA	1,951	455	28	OHIO	739	298	56
ATLANTICO SUR Y GOLFO	648	280	35	ATLANTICO NORTE	428	88	11
ARKANSAS	2,876	771	91	PACIFICO NORTE	385	140	11
COLORADO NORTE	1,170	630	53	MISSISSIPPI NORTE	1,366	280	4



TABLA 4.1

TABLA 4.3  
MAGNITUD DE LA SEDIMENTACION EN EMBALSES  
DE U.S.A., EN  $m^3/km^2/año$

AREA DE CUENCA (Km <sup>2</sup> )	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR
REGIONES SEMIARIDAS		
25.9	3 8 1	1, 6 6 7
259.0	2 8 6	1, 1 9 1
2, 590.0	1 9 1	8 1 0
12, 950.0	1 4 3	4 7 6
25, 900.0	9 5	4 2 9
REGIONES HUMEDAS		
25.9	1 9 1	7 1 4
259.0	1 4 3	5 7 2
2, 590.0	9 5	3 8 1
12, 950.0	8 6	3 3 3

que se han probado se tienen los utilizados en las gráficas que se describen a continuación.

#### RELACIONES PARA LA CUENCA ALTA DEL RIO MISSISSIPPI, U.S.A.

El U.S. Army Corps of Engineers, por medio de su División Norte-Centro, ha efectuado un estudio muy completo sobre la magnitud de las aportaciones de sedimentos, en la cuenca alta del río Mississippi. La enorme cuenca citada ha sido dividida en 20 regiones, habiendo encontrado para cada una de ellas una gráfica que relaciona tamaños de cuenca con aportaciones de material sólido. Estas gráficas se encuentran en la referencia 49, recomendándose su consulta.

#### VALORES REPORTADOS POR R. HERAS R.

Se ha encontrado que existe una determinada relación o correlación, no lo suficientemente representativa, entre la producción de sedimentos y la precipitación máxima trimestral (31,1418). El cociente entre la precipitación máxima trimestral y la precipitación anual, varía de 1.00 a 0.25, según que la precipitación anual ocurra en sólo tres meses (o menos) o que sea uniforme en todos los meses del año.

El cociente anterior es mucho más representativo entre más próximo es a la unidad.

Los valores de la aportación de sedimentos se obtienen con las Figs. 4.1 y 4.2 siguientes. Estas gráficas fueron construidas con los valores tabulados que se encuentran en la citada referencia 31, páginas 1418 y 1419.

#### RELACIONES DE W.B. LANGBEIN Y S.A. SCHUMM.

Estos autores relacionaron la aportación de sedimentos con la precipitación efectiva media anual, definida ésta como la cantidad de lluvia anual requerida para producir un volumen igual al escurrimiento promedio anual de la cuenca. Se encontró que la producción de sedimentos tiene sus valores máximos alrededor de los 254 a 356 milímetros de precipitación efectiva (ver Figs. 4.3 y 4.4), decreciendo hacia ambos lados del máximo, en un caso debido a la escasez de escurrimiento y en el otro por el incremento en la densidad de vegetación (42,1).

Los resultados de los autores se encuentran concentrados en las Figs. 4.3 y 4.4 de la página siguiente. En la primera, se tiene la variación climática de la --

Fig. 4.1

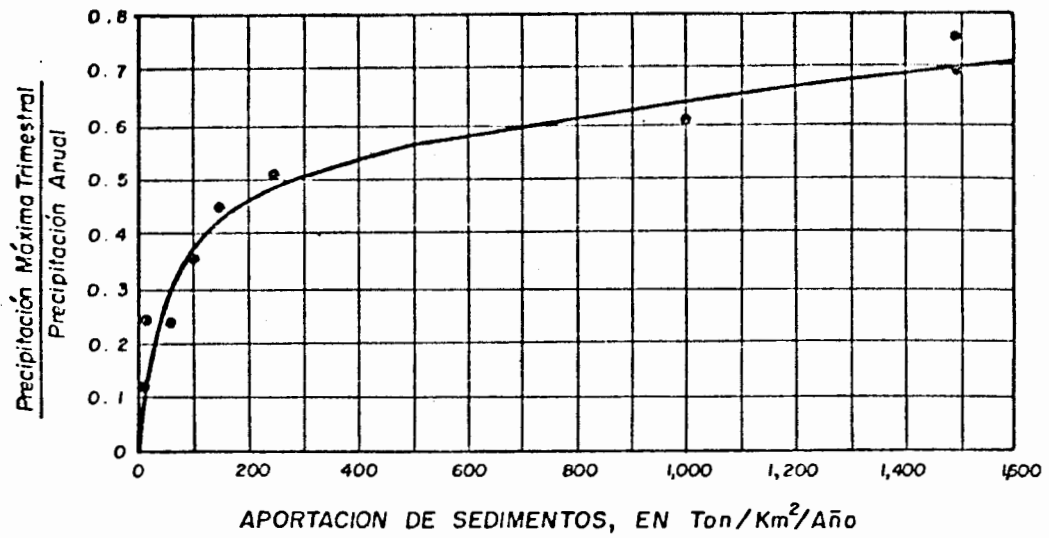


Fig. 4.3

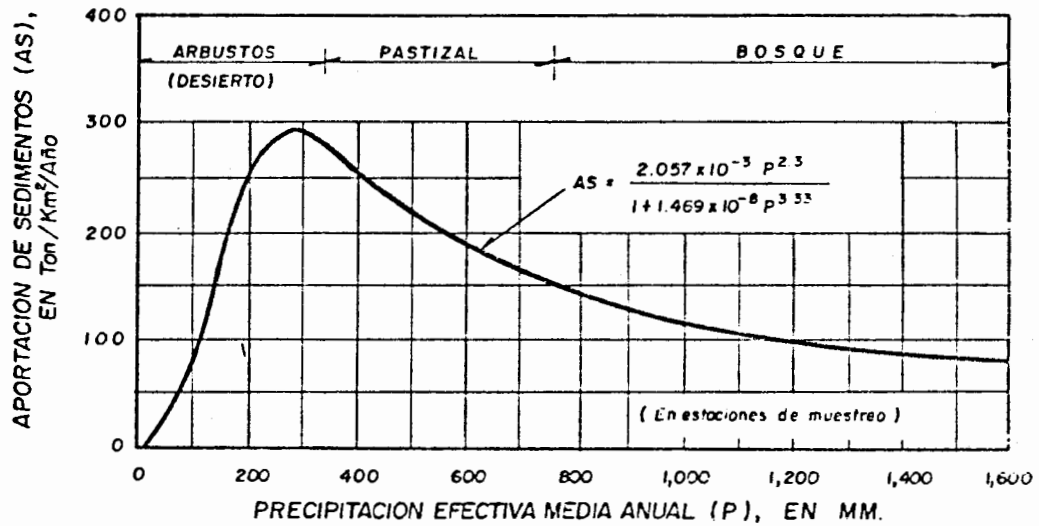


Fig. 4.4

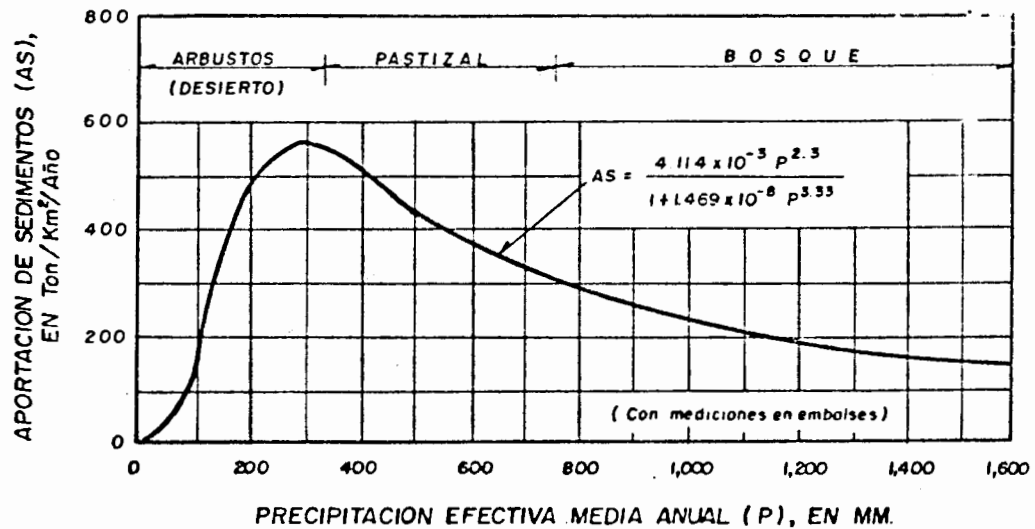
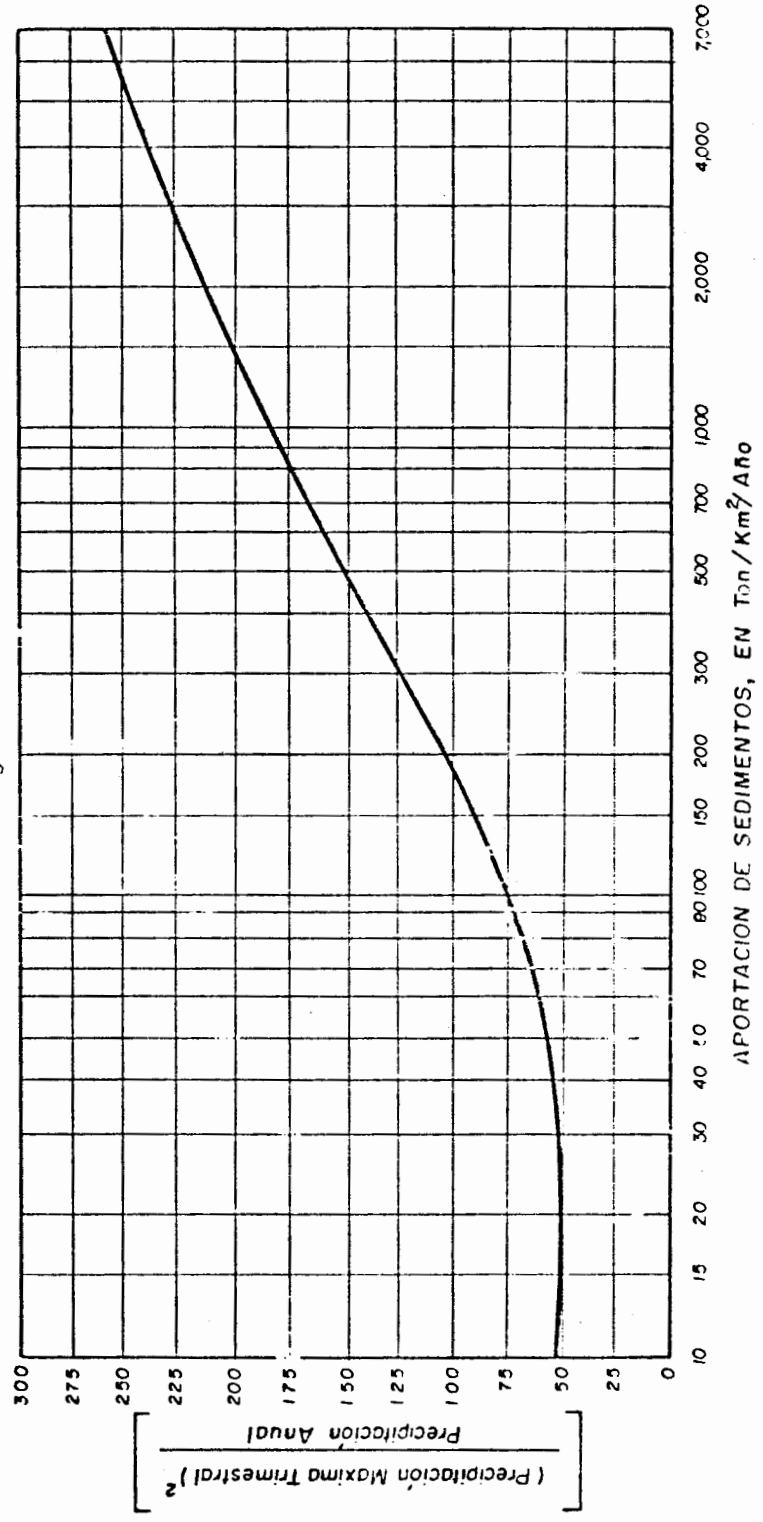


Fig. 4.1



producción de sedimentos, determinada a partir de registros del muestreo de sedimentos. Las estaciones utilizadas tuvieron, en promedio, un área de cuenca del orden de  $3,885 \text{ Km}^2$  ( $1,500 \text{ mi}^2$ ), en cambio, los tamaños de las cuencas de los embalses medidos (batimetrías) presentaron áreas comprendidas entre  $25.9$  y  $129.5 \text{ Km}^2$  ( $10$  a  $50 \text{ mi}^2$ ). Debido a lo anterior, los valores de la primera gráfica son inferiores a los de la segunda, ya que la aportación de materiales sólidos de- crece con la magnitud de cuenca.

Si se consideran correctos los resultados obtenidos por G.M. Brune (42,4), se puede indicar que la aportación de sedimentos es inversamente proporcional a su magnitud de cuenca, elevada a la potencia 0.15, entonces para este caso:

$$\left( \frac{1,500 \text{ mi}^2}{30 \text{ mi}^2} \right)^{0.15} \cong 1.80 \quad (4.2)$$

Si se multiplican los valores de la primera gráfica por 1.80, se observará una concordancia bastante buena en las magnitudes reportadas en ambas figuras. Además con el criterio anterior, se pueden efectuar las correcciones requeridas a los valores leídos en cada gráfica, según el caso que se analiza.

#### EXPERIENCIAS DEL U.S. BUREAU OF RECLAMATION.

En la Fig. 4.5 de la página siguiente, se tiene una relación entre la aporta- ción de sedimentos y el área de cuenca, la cual fue desarrollada en base a medi- ciones en varios embalses seleccionados en la región suroeste de U.S.A., con- prendiendo los estados de Nuevo México, Arizona y California (85,2).

#### 4.3.5 FORMULAS EMPIRICAS PARA LA ESTIMACION DE LA APORTACION DE SEDIMENTOS.

Las fórmulas empíricas serán presentadas en dos grupos, estos son:

- 1o. Fórmulas Empíricas PARTICULARES. Englobando este grupo todas las fó- mulas que han sido desarrolladas en una determinada región o país, o cubriendo sólo un área específica.
- 2o. Fórmulas Empíricas GENERALES. Dentro de este grupo quedan comprendi- dos aquellos criterios que fueron desarrollados con los datos disponi- bles de otros países y que por tanto, son teóricamente aplicables a cualquier área o región.

##### 4.3.5.1 FORMULAS EMPIRICAS PARTICULARES.

Fórmulas Empíricas Particulares, para una determinada área o zona geográfica.

Existen bastantes fórmulas de este tipo en la literatura especializada, entre - todas ellas se han seleccionado como representativas las 5 siguientes:

FORMULA DE L.C. GOTTSCHALK. Este autor en 1946 demostró que una estimación de - la magnitud de la sedimentación en pequeños almacenamientos y embalses de la zo- na de Pierre-Shale del centro de Dakota del Sur, U.S.A., se puede obtener por la fórmula siguiente (25,26):

$$S = 0.0522 C + 822.9542 A + 330.7014 T - 2,217.093 \quad (4.3)$$

donde:

S = magnitud de la sedimentación ocurrida en un embalse, en  $\text{m}^3$ .

C = capacidad total propuesta para el vaso, en  $\text{m}^3$ .

A = área de cuenca del embalse, en  $\text{Km}^2$ .

T = lapso en el que ocurrirá la sedimentación del vaso, en años.

FORMULA DE NAMBA (40,3):

$$AS = 0.292 P + 0.474 H - 0.118 F + 2.452 \quad (4.4)$$

en la cual:

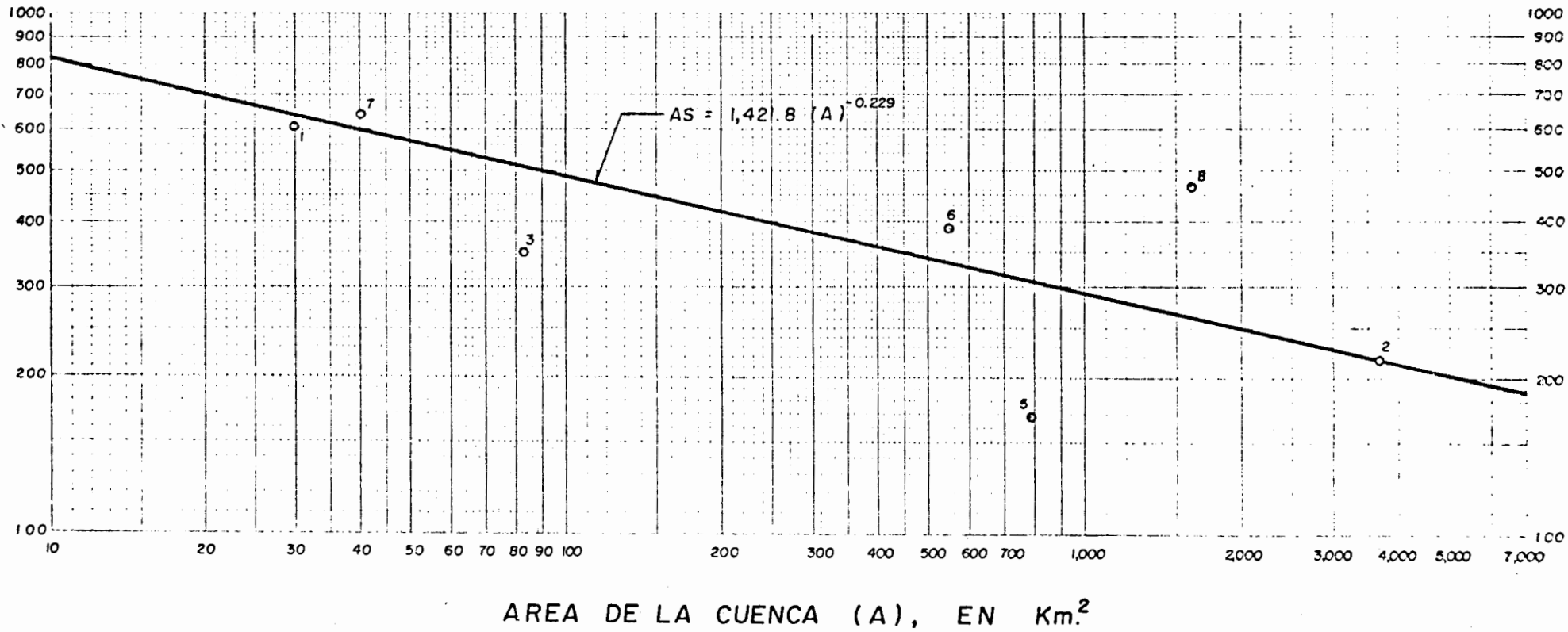
AS = aportación de sedimentos, en  $\text{m}^3/\text{Km}^2/\text{año}$ .

Fig. 4.5

# APORTACION DE SEDIMENTOS PROMEDIO ANUAL EN FUNCION DEL AREA DE CUENCA

( SEGUN U.S. BUREAU OF RECLAMATION )

APORTACION DE SEDIMENTOS (AS), EN  $m^3/km^2/año$



P = precipitación media anual, en milímetros.

H = desnivel total de las elevaciones de la cuenca, en metros.

F = relación del área de suelo desnudo al área de suelo cubierto de vegetación, en porcentaje.

FORMULA DE J.B. OWEN Y F.A. BRANSON (1970), para cuencas en el oeste del Estado de Colorado, U.S.A. (q,7):

$$AS = 19,464.6 (H/L) + 14.29 Ps - 604.8 \quad (4.5)$$

en donde:

AS = aportación de sedimentos, en  $m^3/Km^2/año$ .

H/L = cociente entre el desnivel máximo de cotas en la cuenca y la longitud total del colector o cuace principal, adimensional.

Ps = porcentaje de suelo desnudo en la cuenca.

FORMULA DE NAMBA-YAMAGUCHI (40,3):

$$AS = 6.398 H^{0.72} q^{1.67} \quad (4.6)$$

siendo:

AS = aportación de sedimentos de la cuenca, en  $m^3/Km^2/año$ .

H = desnivel total en las elevaciones de la cuenca, en metros.

q = gasto específico máximo anual, en  $m^3/Km^2$ .

FORMULA DE MURANO (40,3), obtenida en base a datos de 103 embalses.

$$AS = 10^{-3.2} A^{-0.21} p^{0.97} Me^{1.21} Sc^{0.68} \quad (4.7)$$

donde:

AS = aportación de sedimentos de la cuenca, en  $m^3/Km^2/año$ .

A = área de cuenca, en  $Km^2$ .

P = precipitación media anual, en milímetros.

Me = elevación media de la cuenca, en m.s.n.m.

Sc = pendiente promedio de la cuenca, adimensional.

#### Fórmulas Empíricas Particulares, para una región o país.

FORMULAS DE F.E. DENDY Y G.C. BOLTON (1976), los autores relacionaron la magnitud de la sedimentación en 80 embalses de U.S.A., con su área de cuenca y con su escurrimiento promedio anual. Los tamaños de las cuencas variaron entre 2.6 y -- 77,697  $Km^2$  (1 a 30,000  $mi^2$ ) y el escurrimiento fluctuó desde cercano a cero hasta 1,270 mm/año. (63,5). Las fórmulas de los autores son:

Para zonas con escurrimiento promedio anual menor a 50.8 mm/año.:

$$AS = 101.25 Q^{0.46} (1.5374 - 0.26 \log A) \quad (4.8)$$

y para las otras zonas (  $Q > 50.8$  mm/año.):

$$AS = 685.82 e^{-2.165 \cdot 10^{-3} Q} (1.5374 - 0.26 \log A) \quad (4.9)$$

siendo:

AS = aportación de sedimentos, en  $Ton/Km^2/año$ .

Q = escurrimiento promedio anual, en milímetros por año.

A = área de cuenca, en  $Km^2$ .

e = base de los logaritmos naturales.

FORMULA DE ELLIOTT M. FLAXMAN. Las cuencas del Oeste de U.S.A., fueron utilizadas por Flaxman porque es una región ampliamente variada en clima, geología, topografía, tipos de suelo, vegetación y usos del terreno. La región comprende 11

estados que son: Arizona, California, Colorado, Idaho, Montana, Nevada, Nuevo México, Oregon, Utah, Washington y Wyoming. De tal región el autor utilizó los datos de 39 embalses para desarrollar una ecuación de regresión múltiple cuyo coeficiente de correlación fue 0.958 (20,8), la fórmula es:

$$\log(Y+100) = 6.21301 - 2.19113 \log(X_1+100) + 0.06034 \log(X_2+100) - 0.01644 \log(X_3+100) + 0.04250 \log(X_4+100) \quad (4.10)$$

siendo:

Y = aportación de sedimentos, en acre-ft/mi<sup>2</sup>/año. (variable dependiente).

X<sub>1</sub> = parámetro de clima, lo definió Flaxman, como la relación entre la precipitación promedio anual (P), en pulgadas y la temperatura media anual (T), en grados Fahrenheit.

Entonces, la variable independiente X<sub>1</sub>, expresada en sistema métrico será:

$$X_1 = \frac{2.187 \cdot 10^{-2} P}{(T + 17.7778)} \quad (4.11)$$

Estando P en milímetros y T en grados centígrados.

X<sub>2</sub> = parámetro de topografía, igual a la pendiente de la cuenca, calculada por ejemplo, con el criterio de Alvord y expresada en %.

X<sub>3</sub> = parámetro de características del suelo, considerado igual al porcentaje de partículas mayores a 1.0 milímetros, de una capa de 5.08 cm. de la superficie del terreno.

Esta variable fue introducida para tratar de reflejar la resistencia de las partículas gruesas (grava y fragmentos de roca) al arrastre y transporte, y su influencia en el acorazamiento del suelo, reduciéndose de este modo la pérdida de suelo y por lo tanto, la aportación de sedimentos.

X<sub>4</sub> = parámetro de características del suelo. Esta última variable independiente es un indicador de las características de dispersión o asociación de las partículas arcillosas del terreno, de tamaño menor a 2 micras (2.0 μm.).

También utiliza una muestra de 5.08 cm. de espesor del suelo, para obtener la variable X<sub>4</sub>, según las siguientes consideraciones.

Los datos de campo indican que las partículas que tienden a asociarse o unirse, resisten mucho más a la acción erosiva que aquellas partículas que están dispersas, lo cual es perfectamente lógico.

El pH del suelo fue utilizado por Flaxman como un medio general para clasificar los suelos en su tendencia a dispersarse o a unirse. Los suelos con pH mayor de 7 son generalmente correspondientes a zonas de bajas precipitaciones y vegetación escasa (regiones áridas), como resultado, estos suelos tienen bajos contenidos de materia orgánica y son muy fácilmente dispersables. En cambio los suelos con pH menor de 7 son ubicados con zonas de altas precipitaciones y densa vegetación (regiones húmedas). Estos suelos contienen gran cantidad de materia orgánica y tienen un alto grado de asociación o resistencia a la dispersión y por consecuencia a la erosión (20,3).

La determinación del parámetro X<sub>4</sub>, se define como sigue:

- Quando el pH es mayor de 7.0 (alcalino), se le fija un signo positivo al porcentaje de suelo menor o igual a 2 micras.
- Quando el pH es igual o menor a 7.0 (neutral o ácido), el porcentaje de suelo menor o igual a 2 micras toma un signo negativo.



La fórmula de Flaxman en sistema métrico y en forma explícita su variable dependiente Y, puede ser escrita de la manera siguiente:

$$Y = 7.7777 \cdot 10^8 \frac{(X_2+100)^{0.06034} (X_4+100)^{0.04250}}{(X_1+100)^{2.19113} (X_3+100)^{0.01644}} - 4.7626 \cdot 10^4 \quad (4.12)$$

estando Y en  $m^3/Km^2./año.$  y todas las variables independientes en sistema métrico, como fueron definidas anteriormente.

FORMULA DE VIJAY P. SINGH.

Este autor utilizando los mismos datos que empleó Flaxman y también los mismos parámetros  $X_i$ , definió una ecuación de regresión múltiple LINEAL, con un coeficiente de correlación múltiple de 0.883 (80,2).

La ecuación propuesta por Singh en sistema inglés (ec. original) es:

$$Y = 0.60854 - 0.76099 X_1 + 0.03806 X_2 - 0.01252 X_3 + 0.04227 X_4 \quad (4.13)$$

la ecuación anterior, ya expresada en sistema métrico es:

$$Y = 289.821 - 362.427 X_1 + 18.126 X_2 - 5.963 X_3 + 20.131 X_4 \quad (4.14)$$

estando Y en  $m^3/Km^2./año.$  y los parámetros  $X_i$  como se describieron anteriormente.

#### 4.3.5.2 FORMULAS EMPIRICAS GENERALES.

FORMULAS O CORRELACIONES DE FEDERIC FOURNIER.

F. Fournier presentó en 1960, 4 ecuaciones que permiten obtener la aportación de sedimentos, en función de un coeficiente climático denominado: Índice de Fournier (0,5), el cual es fácilmente calculable.

Inicialmente el autor trabajó con 96 cuencas de ríos de todo el mundo, la mayoría de gran extensión, sin haber llegado a conclusiones muy confiables. Posteriormente sólo procesó 46 cuencas de tamaños menores, debido a esto puede afirmarse que sus resultados son aplicables a cuencas con tamaños superiores a 100  $Km^2.$  e inferiores a los 2,000  $Km^2.$ , siempre y cuando no exista alguno o varios factores naturales o no, de marcada influencia en el proceso erosivo, como son: deslizamientos, deforestación acusada, embalses u otras obras, etc. (30,53).

HIPOTESIS: Fournier establece que, cuando la erosión es determinada por sus factores naturales (suelo, vegetación, relieve y precipitación), sin influencia notoria de otros, ya citados, la precipitación es el parámetro dominante (30,53).

CLASIFICACION DE CLIMAS: Fournier utilizó la clasificación de climas de M. Turc, según la cual:

clima HUMEDO:	$P_a > p_1$
clima SEMIARIDO:	$p_2 \leq P_a \leq p_1$
clima ARIDO:	$P_a < p_2$

donde:

$P_a$  = precipitación anual, en milímetros.

$$p_1 = 0.632 L$$

$$p_2 = 0.316 L$$

$$\text{siendo el parámetro L igual a: } L = 300 + 25 T + 0.05 T^3 \quad (4.15)$$

con T igual a la temperatura media del año en cuestión, en  $^{\circ}C$ .

CLASIFICACION DE RELIEVES: Fournier empleó para la definición del tipo de relieve

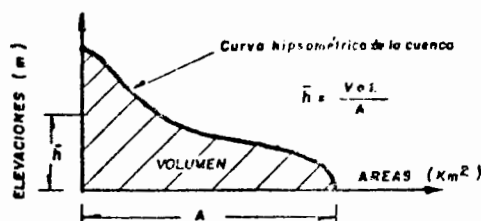
ve de la cuenca, el COEFICIENTE OROGRAFICO, definido como (1,8):

$$Co = \bar{h} \tan \alpha \quad (4.16)$$

donde:

Co = coeficiente orográfico, adimensional.

$\bar{h}$  = altura media de la cuenca, definida como el cociente entre el volumen total del relieve de la cuenca y su proyección horizontal (A), expresada en metros.



$\tan \alpha$  = coeficiente de masividad, igual a la altura media de la cuenca dividida entre su magnitud (A) en  $Km^2$ , por lo cual sus unidades son:  $m/Km^2$  (1,8).

De acuerdo a las definiciones anteriores:  $Co = (\bar{h})^2 / A \quad (4.16')$

El coeficiente orográfico, según Fournier puede servir para definir el tipo de relieve de la cuenca en estudio, de la manera siguiente (47,235):

$Co > 6$  : relieve ACENTUADO.

$Co < 6$  : relieve POCO ACENTUADO.

INDICE DE FOURNIER: A la relación entre el cuadrado de la precipitación máxima mensual ( $P_m$ ) y la precipitación anual ( $P_a$ ), (ambas en milímetros) se le conoce como Coeficiente Climático o Índice de Fournier, y es una medida de la abundancia y forma de distribución durante el año, de la precipitación. Se designa por X.

FORMULAS: Las ecuaciones obtenidas por F. Fournier son las siguientes (30,54):

Primera:  $Co < 6$  y  $X < 20$ ;  $AS = 0.14 X - 49.78 \quad (4.17)$   
 $r = 80\%$

Segunda:  $Co < 6$  y  $X > 20$   $AS = 27.12 X - 475.43 \quad (4.18)$   
 $r = 96\%$

Tercera:  $Co > 6$  y clima Húmedo y Arido:  $AS = 52.49 X - 510.71 \quad (4.19)$   
 $r = 95\%$

Cuarta:  $Co > 6$  y clima Semiárido:  $AS = 91.78 X - 737.62 \quad (4.20)$   
 $r = 98\%$

siendo:

AS = aportación de sedimentos, en  $Ton/Km^2/año$ .

X = índice de Fournier, en milímetros.

Co = coeficiente orográfico, adimensional.

r = coeficiente de correlación lineal, en porcentaje.

FORMULA GENERAL: Con el objeto de simplificar la aplicación del criterio de F. - Fournier, una sola ecuación general ha sido propuesta (17,8), ésta es:

$$\log AS = 2.65 \log X + 0.46 \log \frac{(\bar{h})^2}{A} - 1.56 \quad (4.21)$$

estando  $\bar{h}$  en metros, A en  $Km^2$  y AS en  $Ton/Km^2/año$ , como en las ecuaciones originales.

PROCEDIMIENTO DE APLICACION: El desarrollo del criterio se lleva a cabo según los pasos siguientes:

10. Se determina el valor del coeficiente orográfico de la cuenca.
20. Se calcula para cada año su índice de Fournier (X) y su tipo de clima.
30. Se evalúa en cada año la aportación de sedimentos, con la fórmula correspondiente y preferentemente con la ecuación general.
40. Se obtiene el promedio de los valores calculados de la aportación de materiales sólidos, en el período de análisis (número de años de registro de la estación o estaciones climatológicas utilizadas).

#### FORMULAS DE J.M.L. JANSEN Y R.B. PAINTER.

Jansen y Painter desarrollaron en 1973, unas ecuaciones de regresión lineal que relacionan la aportación de sedimentos media anual, con ciertas variables climáticas y topográficas, en ríos con áreas de cuenca MAYORES a 5,000 Km<sup>2</sup>. y para cada una de las cuatro grandes zonas climáticas definidas en el mundo (34,1).

HIPOTESIS: Los autores adoptaron dos hipótesis fundamentales:

- 1a. El proceso de erosión en diferentes zonas climáticas, está al parecer controlado por diferentes factores.
- 2a. Las mediciones de sedimentos en suspensión son un confiable índice -- del transporte total de sedimentos (material sólido).

DATOS UTILIZADOS: Los datos del transporte promedio anual de sedimentos en suspensión de 79 cuencas mayores de 5,000 Km<sup>2</sup>., empleados por los autores fueron tomados de diversas referencias (34,3).

CLASIFICACION DE CLIMAS: Las cuencas fueron agrupadas de acuerdo a 4 zonas, definidas por la clasificación de climas de G.T. Trewartha (1943), ésta es:

Clima A: tropical, lluvioso y donde la temperatura media del mes más frío es mayor de 18 °C.

Clima B: seco, con  $r < 2$ , donde el parámetro  $r$  es definido por la ecuación:

$$r = P/T + C \quad (4.22)$$

siendo:

P = precipitación media anual, en milímetros.

T = temperatura promedio anual, en °C.

C = coeficiente, con los valores siguientes:

C = 0, para lluvias que ocurren principalmente en el invierno.

C = 7, para lluvia uniforme a través del año.

C = 14, para lluvias que ocurren principalmente en el verano.

Clima C: húmedo, mesotermal, donde el mes más frío tiene una temperatura promedio superior de 0 °C pero inferior de 18 °C y el mes más cálido -- presenta una temperatura media superior a 10 °C.

Clima D: húmedo, microtermal, donde el mes más frío tiene una temperatura -- promedio inferior a 0 °C y el mes más cálido presenta una temperatura media superior a 10 °C.

VARIABLES CLIMATICAS Y TOPOGRAFICAS. Las ocho variables utilizadas por los autores en la correlación definitiva fueron:

AS = aportación media de sedimentos en suspensión, en Ton/Km<sup>2</sup>./año.

D = escurrimiento específico medio anual, en 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>/Km<sup>2</sup>.

A = área de cuenca, en Km<sup>2</sup>.

H = altitud de la cuenca, en metros sobre el nivel del mar.

- R = cociente de relieve-longitud del cauce principal (el relieve es la máxima diferencia de elevaciones en el cauce principal), en m/Km.
- P = precipitación media anual, en milímetros.
- T = temperatura promedio anual, en °C.
- V = grandes grupos de vegetación natural de las cuencas, con los valores siguientes:
- V = 4, bosque.
  - V = 3, pasto.
  - V = 2, estepa (vegetación herbácea).
  - V = 1, desierto.
- G = parámetro que define la propensión a la erosión, de las formaciones geológicas de distintas edades, los valores siguientes fueron adoptados:
- G = 3, paleozoico.
  - G = 5, Mesozoico.
  - G = 6, Cenozoico.
  - G = 2, Cuaternario.

FORMULAS: Las ecuaciones obtenidas, eliminando variables no significativas en un nivel del 90%, son las que se citan a continuación:

$$\text{CLIMA A: } \log AS = 4.354 + 1.527 \log D - 0.302 \log A + 0.296 \log R - 3.417 \log T \quad (4.23)$$

CLIMA B:

$$\log AS = 12.133 - 0.340 \log D + 1.590 \log H + 3.704 \log P + 0.936 \log T - 3.495 \log V \quad (4.24)$$

CLIMA C: para  $R \leq 3$

$$\log AS = 6.976 + 0.444 \log D - 1.674 \log A + 3.860 \log H - 1.665 \log R + 3.425 \log T \quad (4.25)$$

CLIMA C: para  $R > 3$

$$\log AS = -3.055 - 1.125 \log A + 0.585 \log H + 1.104 \log R + 3.056 \log P - 3.053 \log V \quad (4.26)$$

$$\text{CLIMA D: } \log AS = -5.073 + 0.514 \log H + 2.195 \log P - 3.706 \log V + 1.449 \log G \quad (4.27)$$

FORMULA GENERAL: Jansen y Painter propusieron una fórmula general, para todos los climas y así evitar su determinación, ésta es (34,8):

$$\log AS = -2.032 + 0.100 \log D - 0.314 \log A + 0.750 \log H + 1.104 \log P + 0.368 \log T - 2.324 \log V + 0.786 \log G \quad (4.28)$$

Lógicamente ésta fórmula tiene una menor precisión que las anteriores, pues por ejemplo, su coeficiente de correlación múltiple es 0.761 .

Por último, los autores reportan para cada zona climática los valores medios de la aportación de sedimentos y de la llamada: Denudación, es decir, las toneladas por año de materiales sólidos (sedimentos) que las tierras descargan o depositan en el mar, las magnitudes son las concentradas en la TABLA 4.4 de la página siguiente.

Los valores medios de la TABLA 4.4, comparados con los recabados por J.N. Holman en 1968 (32,10), presentan una excelente correspondencia, como se observa en

la TABLA 4.5 siguiente.

TABLA 4.4

CLIMA	AREA	APORTACION DE SEDIMENTOS (Ton/Km <sup>2</sup> /año)	DENUACION (Ton/año)
A	29.7 x 10 <sup>6</sup>	71.5	2.12 x 10 <sup>9</sup>
B	39.1 x 10 <sup>6</sup>	169.0	6.61 x 10 <sup>9</sup>
C	23.1 x 10 <sup>6</sup>	714.4	1650 x 10 <sup>9</sup>
D	31.7 x 10 <sup>6</sup>	46.5	1.48 x 10 <sup>9</sup>
		PROM = 250.35	Σ = 26.71 x 10 <sup>9</sup>

TABLA 4.5

AUTOR	APORTACION DE SEDIMENTOS (Ton/Km <sup>2</sup> /año)	DENUACION (Ton/año)
Fournier	570.9	51.1 x 10 <sup>9</sup>
Kuenen	320.5	32.5 x 10 <sup>9</sup>
Gilluly	313.5	31.7 x 10 <sup>9</sup>
Pechinou	238.2	24.2 x 10 <sup>9</sup>
Schumm	201.4	20.5 x 10 <sup>9</sup>
Holeman	182.1	18.3 x 10 <sup>9</sup>
Lopatin	124.3	12.7 x 10 <sup>9</sup>
PROMEDIO	278.7	27.3 x 10 <sup>9</sup>
PROMEDIO*	251.1	25.4 x 10 <sup>9</sup>

\* Eliminando los valores máximo y mínimo (Fournier y Lopatin)

#### 4.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS CRITERIOS EMPIRICOS.

Las tablas, gráficas y fórmulas empíricas tienen como ventaja fundamental la rapidez con la cual permiten obtener una estimación de la aportación de sedimentos, sin embargo, sólo deben ser empleados para acotar tal estimación y concluir algún valor a partir del análisis crítico de sus resultados. Además, no debe de extrañar al utilizar estos métodos que se obtengan valores absurdos, o simplemente con amplia variación unos de otros, pues cada uno de ellos se está aplicando a condiciones diferentes a aquéllas en las cuales fueron deducidos.

Por otra parte, los criterios empíricos que reportan sus resultados en unidades de volumen, llevan consigo otro error, ya que no permiten introducir el peso volumétrico estimada para los sedimentos de la cuenca en estudio, valor que definitivamente cambia de un lugar a otro y por lo tanto, no coincidirá con el que se uti-

lizó al obtener el método empírico, introduciéndose entonces, el error citado.

#### 4.5 ESTIMACION DE LA APORTACION DE SEDIMENTOS DE LA CUENCA, UTILIZANDO LA FORMULA UNIVERSAL DE PERDIDA DE SUELO (FUPS).

##### 4.5.1 INTRODUCCION.

La llamada Fórmula Universal de Pérdida de Suelo (FUPS), propuesta por Walter H. Wischmeier y Dwight D. Smith en 1958, es muy útil para estimar las pérdidas de suelo que sufrirán los diferentes terrenos, porque tal ecuación fue desarrollada en base a datos de pequeñas parcelas.

De acuerdo a sus autores, el objetivo principal de la FUPS fue ayudar a cuantificar la cantidad de suelo erosionado en un área, para cada alternativa factible de sistema de cultivo y prácticas de conservación, en conjunción con los otros factores que determinan la erosión de los terrenos (97,1).

Desafortunadamente, la FUPS ha sido muy poco empleada en el cálculo de la magnitud de los sedimentos producidos por una cierta área, para después predecir la aportación de sedimentos de toda la cuenca (99,1).

El tamaño máximo de las cuencas que han sido analizadas con este criterio, se puede acotar en los 20 Km<sup>2</sup>., ya que por ejemplo, Williams y Berndt en 1972, estudiaron cinco cuencas con tamaños menores de 17.7 Km<sup>2</sup>. (99,5) y Sánchez B. ilustró el criterio anterior con el análisis de una cuenca de 12 Km<sup>2</sup>. (74,4).

Sin embargo, aunque el tamaño de las cuencas es importante, es mucho más conveniente observar y concluir sobre la homogeneidad de la cuenca, pues cuando la cobertura vegetal, el uso del terreno o las prácticas de conservación difieren notoriamente en las diversas áreas o zonas de la cuenca (independientemente del tamaño de ésta), la aportación de sedimentos debe ser calculada por separado para cada fuente de material erosionado, como será expuesto en el inciso siguiente.

##### 4.5.2 ADAPTACIONES A LA FUPS.

Para el estudio efectuado por Williams y Berndt en la zona de Blackland en Texas, U.S.A., utilizando cinco cuencas pequeñas, los autores hicieron ciertos ajustes a la FUPS para poder calcular cada uno de sus factores al ser aplicada a la totalidad de tales cuencas. La FUPS consta de 6 términos, los cuales toman en cuenta cada una de las siguientes características (97,4):

$$E = \alpha R K L S C P \quad (4.29)$$

siendo:

E = pérdida de suelo estimada, en este caso en Ton/Km<sup>2</sup>./año., en la cuenca.

$\alpha$  = factor de conversión de unidades inglesas (Ton/acre/año.) a unidades métricas (Ton/Km<sup>2</sup>./año.), igual a 224.20

R = factor de erosividad de la lluvia y del escurrimiento, en el Anexo II se presentan los criterios disponibles para su evaluación.

K = factor de erosionabilidad del suelo.

LS = factor de longitud y pendiente del terreno o área en estudio.

C = factor de cultivo y cobertura vegetal.

P = factor de prácticas de conservación.

En el Anexo I, se exponen los métodos o criterios existentes para la evaluación de cada uno de los factores anteriores, en este caso para la cuantificación de los  $K_i$ ,  $C_i$  y  $P_i$ . Cuando la FUPS sea empleada para el cálculo de la aportación de sedimentos de una cuenca, todos los factores anteriores serán modificados con excepción del factor del potencial erosivo de la lluvia R.

El factor K, para la cuenca es determinado por el "pesado" de los valores  $K_i$  de cada tipo de suelos en la cuenca, de acuerdo a la magnitud de área  $A_i$  cubierta por cada uno de ellos, esto es:

$$K = \frac{\sum K_i \cdot A_i}{A} \quad (4.30)$$

donde A es el área total de la cuenca, en Km<sup>2</sup>. y la sumatoria es de i=1 a n, --- siendo n el número de suelos diferentes en tal cuenca.

El término L o longitud de la pendiente, será para la cuenca la longitud promedio del flujo sobre el terreno. Para determinar L, se considera a la cuenca de forma rectangular con sólo un cauce en el centro, extendiéndose a lo largo; entonces el ancho B del rectángulo, será igual a el área de cuenca A, en Km., dividida entre la longitud total de cauces Lc, en Km<sup>2</sup>, es decir:

$$A = Lc \cdot B \quad \therefore \quad B = A/Lc \quad (4.31)$$

Al estar en cauce localizado en el centro de la cuenca (rectángulo), la longitud de flujo sobre el suelo será la mitad del ancho B, por lo cual, el factor L buscado, en metros, se evaluará con la fórmula:

$$L = 500 (A/Lc) \quad (4.32)$$

Este es el criterio propuesto por Williams y Berndt, expuesto en la referencia - 99.

Otro criterio para evaluar el factor L ha sido sugerido por J. Magallanes P. (-- 50,42) y consiste en calcular la densidad de drenaje D, definida como la longitud total de todos los cauces de la cuenca Lc, entre su área A; después se obtiene el recíproco del cociente anterior y este valor se interpreta como el área de cuenca que está drenada por la unidad de longitud de cauce.

Por último, se considera que dicha área estará definida por un círculo que tiene por diámetro la unidad de drenaje y perpendicular a éste un radio que será igual al valor de L buscado, esto es:

$$L = d/2 ; \quad D = Lc/A \quad \therefore \quad 1/D = A/Lc$$

$$A/Lc = (1/4) d^2 \quad \therefore \quad L = 1/2 \sqrt{4 A/\pi Lc} \quad (4.33)$$

$$L = 564.2 \sqrt{A/Lc} \quad (4.33!)$$

siendo:

L = longitud representativa de las pendientes de la cuenca, en metros.

A = área de cuenca, en Km<sup>2</sup>.

Lc = longitud total de todos los cauces en la cuenca, en Km.

Por último, Sánchez B. utiliza para la determinación del factor L de la cuenca - (74,4), las longitudes medias de todos los recorridos del escurrimiento superficial desde su inicio hasta su entrada a algún cauce, obtiene el promedio y esta magnitud la considera representativa del factor L en tal cuenca (26,19).

El término S de pendiente del terreno en la cuenca, será definido por la pendiente de la cuenca evaluada con el criterio de Alvord, según Williams y Berndt (99, 3).

Gracia, Magallanes y Aparicio, utilizan en cambio el criterio de Horton para evaluar la pendiente de la cuenca ( 26,18).

De lo anterior, se obtiene que la expresión del factor LS para la cuenca y en -- sistema métrico es:

$$LS = L^m (0.0013905 S^2 + 0.009694 S + 0.01318) \quad (4.34)$$

donde:

L = longitud definida por los criterios descritos anteriormente, en metros.

S = pendiente de la cuenca, calculada por alguno de los criterios citados, Alvord

(104,46) o Horton (50,60), en porcentaje.

$m$  = constante que depende de la pendiente del terreno, según Wischmeier y Smith toma los valores siguientes (97,12):

$m = 0.50$ , para pendientes del terreno mayores del 5%.

$m = 0.40$ , para pendientes del terreno comprendidas entre 3.5 y 4.5%.

$m = 0.30$ , para pendientes del terreno comprendidas entre 1 y 3%.

$m = 0.20$ , para pendientes uniformes menores de 1%.

Williams y Berndt, adoptan un valor de 0.50 para la constante  $m$  (99,3).

El factor  $C$  para la cuenca, es estimado por ponderado de los valores  $C_i$  para cada cobertura vegetal que se desarrolla en determinada zona  $A_i$  de dicha cuenca, - entonces:

$$C = \frac{\sum C_i \cdot A_i}{A} \quad (4.35)$$

donde la sumatoria es desde  $i=1$  hasta  $n$ , siendo  $n$  el número de coberturas vegetales (cultivo, bosque, pastizal, etc.) que existen en la cuenca.

Por último, el factor  $P$  de la cuenca, será evaluado por el peso de los valores  $P_i$  correspondientes al tipo de obras o prácticas de control de la erosión, - en el área  $A_i$  de tal cuenca, esto es:

$$P = \frac{\sum P_i \cdot A_i}{A} \quad (4.36)$$

siendo nuevamente  $n$  el límite superior de la sumatoria, correspondiente al número de prácticas de conservación en la cuenca (terrazas, contorneo, cauces herbosos, etc.).

#### 4.5.3 EVALUACION DE LOS TERMINOS DE LA FUPS PARA LA CUENCA.

Los factores o términos de la FUPS serán estimados para la cuenca en análisis a partir de las fórmulas citadas anteriormente, evaluando cada uno de los  $K_i$ ,  $C_i$  ó  $P_i$  con los criterios o métodos expuestos en el Anexo I. Conviene aclarar desde este instante, que todo el material descrito en el citado Anexo I es el adecuado al estudio o análisis de cuencas rurales y no al de parcelas o zonas de cultivo.

En relación al factor de erosividad de la lluvia  $R$ , los criterios para su estimación se concentran en el Anexo II. Y a este respecto, cuando se utilice el criterio de Gracia, Magallanes y Aparicio, para cuantificar  $R$ , se debe evaluar el factor  $L$  de la cuenca por medio del criterio de estos autores, citado en la referencia 50, y además la pendiente de la cuenca se calculará con el criterio de Horton (50,60).

Por otra parte, Aguiló Bonnin y López Cadena de Llano (1,13), han propuesto un sistema bastante elemental de valores para los factores  $K$ ,  $LS$  y  $C$ , que se utilizan en la FUPS, cuando ésta se aplica a grandes cuencas rurales sin prácticas de conservación, estos son:

#### FACTOR DE EROSIONABILIDAD $K$

TABLA 4.6

TIPO DE SUELO	$K$
Suelos muy erosionables	1.00
Suelos erosionables	0.75
Suelos poco erosionables	0.50
Suelos resistentes	0.40



La clasificación de los tipos de suelos de la cuenca se lleva a cabo en base a un plano geológico y de preferencia en uno de carácter edafológico.

#### 4.5.4 RECOMENDACIONES EN LA EVALUACION DE LOS TERMINOS DE LA FUPS.

Cuando la FUPS es aplicada a cuencas, la evaluación de cada uno de sus términos debe ser sumamente cuidadosa, en especial la cuantificación de los factores de erosionabilidad de suelo (K) y de cobertura vegetal (C), pues las fluctuaciones que tienen los restantes términos (R, LS y P) están dentro de un rango de valores que no llevarán la estimación de la pérdida de suelo (E) a valores absurdos o lejanos a la realidad. En cambio los errores de apreciación en la vegetación y tipos de suelo de la cuenca, pueden conducir a valores de E que no se asemejen a los reales.

#### FACTOR DE VEGETACION C

TABLA 4.7

TIPO DE COBERTURA VEGETAL	C
Bosque ( cubriendo más de 70 % )	0.01
Matorral, Pastos, etc.	0.10
Cultivos Agrícolas	0.30
Sin vegetación	1.00

#### FACTOR DE PENDIENTE-LONGITUD LS

TABLA 4.8

TIPO DE TERRENO	LS
Terrenos normalmente de cultivo ( $S \leq 5\%$ )	1.00
Terrenos de cultivo, en general de temporal y con necesidad más o menos importante de prácticas de conservación ( $5\% < S \leq 20\%$ ).	4.0
Terrenos forestales, pastizales o cultivos con grandes medidas de protección contra erosión ( $S > 25\%$ ).	7.0

#### 4.5.4 ESTIMACION DE LA APORTACION DE SEDIMENTOS DE LA CUENCA.

Como resultado de la aplicación de la FUPS a la cuenca, se obtiene la magnitud total de suelo erosionado, sin embargo, como se indicó anteriormente no todo este material es transportado aguas abajo por los cauces, sino que una parte es nuevamente depositado en ciertas zonas. Debido a lo anterior la aportación de sedimentos de la cuenca, será igual al producto del coeficiente de entrega de sedimentos (CES) por la magnitud estimada de suelo erosionado en la cuenca.

El coeficiente de entrega o de aportación de sedimentos puede ser estimado con los criterios y métodos expuestos en el Anexo III.

En caso de disponer en una determinada región, de datos sobre la magnitud de la aportación de sedimentos, en diversos puntos como: embalses, estaciones de muestreo de sedimentos, etc., se puede aplicar la FUPS a las respectivas cuencas, si éstas son pequeñas, o bien, homogéneas y correlacionar por último las parejas de

valores obtenidas, para llegar a una ecuación de regresión del tipo (38,11):

$$AS = \phi ( E )$$

donde:

AS = aportación de sedimentos total de una cuenca, en Ton/Km<sup>2</sup>./año.

E = pérdida de suelo estimada en la cuenca con la FUPS, en Ton/Km<sup>2</sup>./año.

#### 4.6 CUANTIFICACION DE LA APORTACION DE SEDIMENTOS DE LA CUENCA, A PARTIR DE LA EROSION TOTAL.

##### 4.6.1 INTRODUCCION.

Cuando la cuenca bajo estudio es de extensión respetable o algo heterogénea, la evaluación de su aportación de sedimentos a partir de la estimación de la pérdida de suelo, ya no puede ser llevada a cabo por la simple adaptación y aplicación de la Fórmula Universal de Pérdida de Suelo (FUPS), sino que ahora se deberán de tomar en cuenta las producciones de sedimentos de otras fuentes, diferentes a la erosión laminar y en canalillos, entre las cuales se pueden citar: la erosión en cárcavas, la erosión de las orillas de los cauces, la socavación de las planicies de inundación y las erosiones de carreteras y ferrocarriles, la erosión urbana y de aquellos sitios en construcción, etc.

En criterio consistirá ahora en evaluar la pérdida de suelo en cada fuente de sedimentos y multiplicarla por su respectivo coeficiente de entrega de sedimentos, para obtener por la suma de todas ellas, la producción de sedimentos de la cuenca en un cierto lapso, comúnmente un año.

##### 4.6.2 DATOS REQUERIDOS Y RECONOCIMIENTOS DE CAMPO.

La idea conceptual del criterio de cuantificación de la aportación de sedimentos a partir de la erosión total, pone de manifiesto la gran cantidad de datos que serán requeridos de la cuenca, así como lo delicado de las estimaciones.

En la primera fase del estudio, todas las fuentes de información deben ser sometidas a un análisis para aprovechar los datos aplicables al proyecto, entre la información que se debe procesar está la siguiente (1,2-1):

1. Información climática e hidrológica.
2. Mapas topográficos, de suelos (edafológicos) y geológicos.
3. Mapas y guías para el uso de los suelos.
4. Datos sobre sedimentación en lo relativo a investigaciones de campo, reportes sobre las cuencas estudiadas, planes de trabajo, resultados de los análisis de datos climáticos y de otros tipos, etc.
5. Planes de trabajo e información sobre las necesidades y medidas recomendadas para conservación de suelos, según oficinas o compañías dedicadas a la conservación de los recursos renovables.
6. Mediciones de la sedimentación ocurrida en embalses o datos sobre el transporte de sedimentos en suspensión, aplicables a la cuenca o área bajo estudio.
7. Datos desarrollados o recabados por las universidades, oficinas de gobierno o instituciones privadas, de sitios cercanos o de cuencas de la zona, en relación al problema de la pérdida de suelo, la sedimentación de estructuras u obras civiles, o las técnicas de conservación.

Por otra parte, es esencial que se desarrolle un reconocimiento de la cuenca en estudio, por el grupo de ingenieros que efectuarán los cálculos y preferentemente por un grupo interdisciplinario que incluya: un geólogo, un hidrólogo, un biólogo y un ingeniero civil. En esta segunda fase del estudio se definirá la inten

sidad o alcance de las investigaciones futuras, sobre la erosión y la sedimentación en la zona. De primordial interés son los siguientes reconocimientos (81,--2-1):

10. Investigación sobre la geología, suelos, topografía, uso de terreno, cobertura vegetal y condiciones físico-hidrológicas en relación a:
  - A. Erosión.
  - B. Transporte de Sedimentos.
  - C. Depositación.
20. Naturaleza general y extensión de los daños por erosión y sedimentación, dentro del área de estudio, esto es:
  - a. Erosión:
    - a.1 de zonas de cultivo.
    - a.2 de los bosques.
    - a.3 de los pastizales y terrenos en descanso.
    - a.4 de los cauces y planicies de inundación.
    - a.5 de otras áreas y obras.
  - b. Sedimentación:
    - b.1 en embalses y almacenamientos.
    - b.2 en los cauces y planicies de inundación.
    - b.3 en las zonas urbanas.
    - b.4 en otras estructuras o zonas.
30. Importancia relativa de los daños en las fuentes de sedimentos, para llegar a la definición de las áreas que son ZONAS CRITICAS de producción de sedimentos, esto es zonas de erosión laminar severa y cárcavas activas, donde se tienen de 44,840 a 112,100 Ton/Km<sup>2</sup>./año. (81,-3-21).

#### 4.6.3 FUENTES DE SEDIMENTOS.

##### 4.6.3.1 GENERALIDADES.

Desde un punto de vista muy general, la erosión puede ser dividida en dos grandes grupos: la erosión laminar y la erosión del cauce, ésta última puede ser adicionalmente dividida en: erosión en cárcavas y degradación del cauce. La erosión de carreteras y ferrocarriles, la erosión urbana, etc., constituyen el resultado de la acción de una o una combinación de las erosiones anteriores.

Cada una de las erosiones citadas será analizada y evaluada con las técnicas asequibles a los datos disponibles, como se describirá a continuación.

4.6.3.2 EVALUACION DE LA EROSION LAMINAR. En las diversas áreas sometidas a erosión laminar y en canalillos, la evaluación de ésta se llevará a cabo por la aplicación de la FUPS. Los cálculos serán ordenados en la FORMA DE CALCULO 4.1 de la página siguiente.

La evaluación de cada factor de la FUPS se realizará tomando en cuenta las siguientes fórmulas y comentarios:

**FACTOR DE EROSIVIDAD DE LA LLUVIA (R):** Los criterios disponibles para su estimación se tienen en el Anexo II. En general, se determinará un solo valor para toda la cuenca, ya que raramente se dispone de más de una estación climatológica cercana o dentro de la cuenca bajo estudio.

**FACTOR DE EROSIONABILIDAD DEL SUELO (K):** En el Anexo I, se presenta una tabla y dos nomogramas para su cuantificación, conociendo ciertas características físicas de los suelos.

**FACTOR DE PENDIENTE-LONGITUD (LS):** Para cada área o zona se definirán sus cotas máxima ( $E_M$ ) y mínima ( $E_m$ ), correspondiendo la primera al punto de inicio de la pendiente, es decir, donde se origina el escurrimiento sobre el terreno, y la segunda es la elevación del punto en la pendiente, donde el sedimento inicia su depositación o donde el flujo entra a un cauce (38,4D).

### FORMA DE CALCULO 4.1

## ESTIMACION DE LA EROSION LAMINAR DE LA CUENCA

Proyecto : \_\_\_\_\_ Mpio. : \_\_\_\_\_ Edo. : \_\_\_\_\_ Area de cuenca : \_\_\_\_\_ Km.<sup>2</sup>

Condición de la cuenca : \_\_\_\_\_ ( Actual o Futura )

AREA DE CULTIVO			PASTIZAL Y ZONA DE MONTANA				B O S _ Q U E			PEND. DEL TERRENO		FACTORES DE LA FUPS					PERDIDA DE SUELO ESTIMADA (Ton/Ha.)	AREA ( Ha. )			
TIPO	EN SURCOS A NIVEL	EN FAJAS A NIVEL	TERRACEADO	TIPO	COBERTURA (%)	TIPO	COBERTURA (%)	TIPO	COBERTURA DE ARBOLES (%)	CUBIERTA FORESTAL (%)	VEGETACION INFERIOR	S (%)	LONGITUD Lo (m)	R	K	LS			C	P	
<b>TOTALES</b>																					

Entonces, si H es la distancia horizontal entre  $E_M$  y  $E_m$ , la pendiente (S) y la longitud o desarrollo de ella (L) serán (por el Teorema de Pitágoras):

$$S = 100 \left( \frac{E_M - E_m}{H} \right) \quad (4.36) \quad L = \sqrt{H^2 + (E_M - E_m)^2} \quad (4.38)$$

Llevando la longitud L y el valor de la pendiente del terreno S, a la gráfica dada en el Anexo I, se determina el valor del factor LS.

FACTOR DE COBERTURA VEGETAL (C): En el Anexo I se presentan tres tablas que permiten evaluar el factor C para zonas de cultivo, terrenos en descanso, pastizales y bosques.

FACTOR DE PRACTICAS DE CONTROL DE LA EROSION (P): También en el Anexo I, se tiene una tabla que permite la selección del valor de este factor .

4.6.3.3 ESTIMACION DE LA EROSION DE CARCAVAS. Las cárcavas usualmente siguen a la erosión laminar y en canalillos, comenzando en ligeras depresiones del terreno donde el flujo o escurrimiento se concentra. La forma de la cárcava está generalmente influenciada por la resistencia de los suelos, las condiciones climáticas, la edad de la cárcava y la forma de erosión que en ella tiene lugar (de sus taludes o de su fondo).

Un sistema para clasificar las cárcavas por su magnitud o tamaño es el siguiente (77,167):

NOMBRE	PROFUNDIDAD EN METROS	AREA DE DRENAJE EN Ha.
pequeña.	< 1.0	< 2.0
mediana.	1.0 a 5.0	1.0 a 20.0
grande.	> 5.0	> 20.0

La magnitud de la erosión en las cárcavas puede ser determinada por alguno de los procedimientos siguientes (81,3-2):

- 1o. Por comparación de fotografías aéreas de suelos, con diferencias de varios años.
- 2o. Por medio de datos históricos recabados con los residentes de la localidad, estimando su edad y desarrollo, es decir, su tasa de avance.
- 3o. A partir de estudios de campo, para estimar el promedio anual de erosión lateral (en los taludes) y de incisión (avance de la cabecera de la cárcava).
- 4o. Utilización de criterios empíricos (fórmulas y gráficas) o relaciones obtenidas en campo, para una cierta región.

Para la cuantificación de la pérdida de suelo anual en cada cárcava, el U.S. Soil Conservation Service ha propuesto el criterio que se describe a continuación (81, 3-19). Se miden en campo la profundidad y la longitud de taludes de la cárcava, la longitud puede ser obtenida de las fotografías aéreas de la zona.

Considerando que en la mayoría de los casos la erosión en la cárcava no es activa en la totalidad de la longitud, sino que casi siempre ocurre en un sólo lado y no en ambos, se debe fijar el porcentaje de longitud erosionable del talud en cuestión, pues puede no ser atacable el talud debido a la presencia de materiales (suelos o rocas) no erosionables. Además, se determina la magnitud anual de avance de los taludes, en metros, entonces, la pérdida de suelo anual en cada cárcava será igual a:

$$E_c = l_c \cdot P \cdot D \cdot R \cdot \gamma \quad (4.39)$$

siendo:

- $E_c$  = erosión anual en la cárcava, en toneladas.  
 $l_c$  = longitud de cada lado (talud) de la cárcava, en metros.  
 $P$  = porcentaje de la longitud  $l_c$  que es erosionable, este valor puede fluctuar entre el 90 y el 20%.  
 $D$  = profundidad promedio de la cárcava, en metros.  
 $R$  = magnitud del avance anual de los taludes de la cárcava, en metros.  
 $\gamma$  = peso volumétrico del suelo erosionado, en Ton/m<sup>3</sup>.

En la fórmula anterior se puede introducir otro porcentaje, que tome en cuenta la reducción de la pérdida de suelo ( $E_c$ ), debido a las medidas de control que se adopten (capítulo 10, inciso 6.3), para obtener la erosión futura en la cárcava.

Un tipo de enfoque diferente al anterior, para la cuantificación de la erosión en las cárcavas, puede ser consultado en la referencia 76.

4.6.3.4 DEGRADACION DEL CAUCE. De manera general, la erosión del cauce consiste en la remoción del suelo y rocas, por un flujo concentrado. La erosión de las orillas ocurre por una abrasión lateral, por excavación de las orillas o por una incisión del fondo, en el desarrollo de nuevos cauces en valles aluviales. De cualquier forma la cantidad de suelo erosionado puede ser determinada de la misma forma que para las cárcavas, o bien, a través de las fórmulas y criterios de la Hidráulica Fluvial.

Con respecto a la degradación del fondo del cauce, este problema debe ser atacado con las técnicas de la Hidráulica Fluvial, o por medio de una ecuación semejante a la 4.39, esta es (81,3-19):

$$E_{dc} = W \cdot L \cdot R \cdot \gamma \quad (4.40)$$

en la cual:

- $E_{dc}$  = erosión anual debida a la degradación del fondo del cauce, en toneladas.  
 $W$  = ancho promedio del cauce, en metros.  
 $L$  = longitud del fondo del cauce que es erosionado, en metros.  
 $R$  = magnitud o tasa estimada de degradación del fondo, en m/año.  
 $\gamma$  = peso volumétrico del material del fondo del cauce, en Ton/m<sup>3</sup>.

4.6.3.5 SOCAVACION DE PLANICIES DE INUNDACION. Esta erosión se debe a los gastos de avenida que circulan abarcando toda la planicie de inundación y puede presentarse en forma de una canalización en la planicie, o como erosión laminar de los suelos. De acuerdo a la forma que adopte la erosión en la planicie, será la técnica utilizada para su evaluación, seleccionándola entre las ya descritas.

4.6.3.6 EROSION DE CAMINOS Y FERROCARRILES. Desde un punto de vista general, la pérdida de suelo en las vías terrestres puede acaecer según dos formas diferentes, esto es: la erosión del suelo de su superficie y la socavación de sus orillas y zanjas o cunetas de protección.

Muchos caminos de tierra están ahora varios centímetros por debajo del nivel en el cual fueron construidos, entonces, si la edad aproximada del camino puede ser determinada, la erosión anual se calculará por la fórmula siguiente (81,3-21):

$$E_{ca} = D/\gamma \cdot W \cdot L \cdot \gamma \quad (4.41)$$

en donde:

- $E_{ca}$  = erosión anual en el camino, en toneladas.  
 $D$  = profundidad o espesor de los materiales que han sido removidos del camino, en metros.

- y = número de años que el camino ha estado en servicio.  
 W = ancho promedio de la superficie del camino, en metros.  
 L = longitud de camino que ha sido erosionado, en metros.  
 $\gamma$  = peso volumétrico de los materiales del camino, en Ton/m<sup>3</sup>.

Donde las orillas y zanjas o cunetas de los caminos son erosionadas, sus pérdidas de suelo se pueden estimar por los criterios ya citados cuando se discutió la erosión en cárcavas.

En la referencia 12, se presenta con bastante amplitud este tema, sugiriéndose su consulta para obtener mayor información al respecto.

#### 4.6.4 ESTIMACION DE LA EROSION TOTAL.

La erosión total de una cuenca es la suma de todas las erosiones que tienen lugar en ella, incluyendo erosión laminar, todos los tipos de degradación del cauce y los otros tipos de erosiones que generalmente son una combinación de las anteriores.

La acumulación de las magnitudes estimadas para las pérdidas de suelo, tanto para las condiciones actuales como para aquéllas que se tengan después de la aplicación de las medidas o técnicas de conservación, se llevará a cabo en la primera parte de la FORMA DE CALCULO 4.2 de la página siguiente (81,4-12).

#### 4.6.5 CUANTIFICACION DE LA APORTACION DE SEDIMENTOS DE LA CUENCA.

El producto de la erosión estimada en un área por el coeficiente de entrega de sedimentos, es la aportación de sedimentos de tal área.

El cálculo de la producción de sedimentos se efectuará en la segunda parte de la FORMA DE CALCULO 4.2.

El coeficiente de entrega de sedimentos relativo a la erosión laminar, se estimará con los criterios expuestos en el Anexo III y los correspondientes a las otras fuentes de materiales, serán los sugeridos en la referencia 81, página 4-12, los cuales se han incluido en la citada Forma de Cálculo 4.2.

### 4.7 EVALUACION DE LA APORTACION DE SEDIMENTOS DE LA CUENCA, EN BASE A LA ESTIMACION DEL TRANSPORTE DE MATERIALES SOLIDOS.

#### 4.7.1 INTRODUCCION.

En general, el transporte de sedimentos por la corriente puede ser llevado a cabo en tres formas: en contacto con el fondo, en saltación y en suspensión. El arrastre en contacto más el de saltación originan el llamado: Transporte de Fondo, y la suma de éste más el Transporte en Suspensión es el denominado: Transporte Total o Carga de Sedimentos de la corriente.

Varios autores, entre ellos L.M. Glymph (24,4) han demostrado y concluido que en muchos cauces el transporte en suspensión puede llegar a representar del 90 al 95% del transporte total en la corriente. Por otra parte, V. A. Koelzer (41,2) indica que sólo en casos muy raros, se conoce que el transporte de fondo exceda del 25% del transporte en suspensión.

De acuerdo a lo anterior, si se dispone de un criterio práctico y preciso que permita estimar el transporte en suspensión, se podrá llegar a evaluar la aportación de sedimentos de tal cuenca. En este inciso se expone el método desarrollado por Oswald Rendon-Herrero para cuencas pequeñas, mismo que presenta un enfoque muy diferente al tradicional de los métodos o fórmulas de la Hidráulica Fluvial, pues permite estimar la cantidad de sedimentos transportados en suspensión por una corriente como resultado de un determinado escurrimiento, que ha sido generado por una tormenta.

#### 4.7.2 METODO DE RENDON-HERRERO PARA ESTIMACION DEL TRANSPORTE EN SUSPENSION.



FORMA DE CALCULO 4.2

ESTIMACION DE LA EROSION TOTAL Y CUANTIFICACION DE LA APORTACION DE SEDIMENTOS DE UNA CUENCA

Proyecto : \_\_\_\_\_ Mpio. : \_\_\_\_\_ Edo. : \_\_\_\_\_ Area de cuenca : \_\_\_\_\_ Km.<sup>2</sup>  
 Longitud del colector principal : \_\_\_\_\_ Km. Pendiente promedio del colector principal : \_\_\_\_\_ %  
 Desnivel máximo del colector principal : \_\_\_\_\_ m. Calculó : \_\_\_\_\_ Fecha : \_\_\_\_\_

		CONDICIONES ACTUALES			CONDICIONES FUTURAS		
		PERDIDA DE SUELO (Ton/Ha.)	AREA (Ha.)	TOTAL (Ton.)	PERDIDA DE SUELO (Ton/Ha.)	AREA (Ha.)	TOTAL (Ton.)
EROSION LAMINAR	AREAS DE CULTIVO						
	TERRENOS EN DESCANSO						
	PASTIZAL						
	ZONA DE MONTANA						
	BOSQUE						
		CES (%)	↓	APORTACION DE SEDIMENTOS (Ton.)	CES (%)	↓	APORTACION DE SEDIMENTOS (Ton.)
EROSION LAMINAR (TOTAL)							
EROSION EN CARCAVAS		80			80		
EROSION DE LAS ORILLAS DEL CAUCE		90			90		
DEGRACION DEL FONDO DEL CAUCE		90			90		
SOCAVACION DE PLANICIES DE INUNDACION		85			85		
EROSION DE VIAS TERRESTRES		60			60		
EROSION URBANA Y ZONAS EN CONSTRUCCION							
OTRAS FUENTES							
TOTAL					TOTAL		

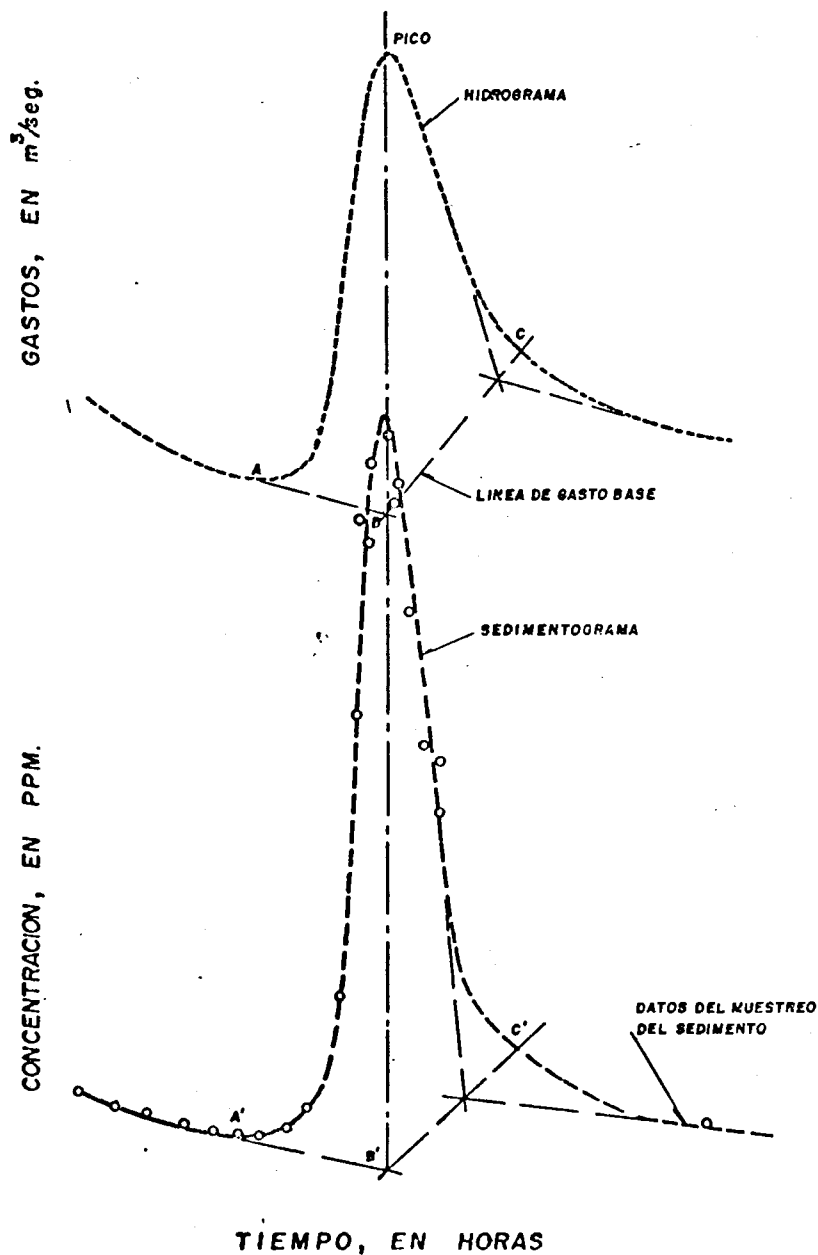


4.7.2.1 DESCRIPCION GENERAL. Como el método sólo es aplicable a cuencas pequeñas, el primer problema que surge es acotar el tamaño de éstas, pues se dice que una cuenca es pequeña cuando la distribución espacial de la lluvia es uniforme sobre toda su área. A este respecto, algunos autores han definido como cuenca pequeña aquella con área menor de  $100 \text{ mi}^2$ , es decir,  $260 \text{ Km}^2$ . aproximadamente (72,3).

Por otra parte, las partículas finas y los materiales coloidales transportados - en suspensión producirán un "sedimentograma" (gráfica de las descargas de sedimentos con respecto al tiempo) de forma paralela a su correspondiente hidrograma (ver Fig. 4.6 siguiente); sin embargo, bajo similares condiciones de la corriente, las partículas gruesas en transporte no definirán sedimentogramas de forma paralela a sus gráficas de gastos líquidos.

La aplicabilidad del método de Rendon-Herrero radica o depende del grado de paralelismo en las formas del sedimentograma y su respectivo hidrograma, para un escurrimiento dado.

Fig. 4.6



La premisa original propuesta en el desarrollo del método fue la aplicación del concepto del hidrograma unitario al análisis de los sedimentogramas.

Un hidrograma unitario es un hidrograma de escurrimiento directo resultante de un centímetro de lluvia en exceso considerada distribuida uniformemente sobre toda el área de drenaje, en un tiempo específico llamado: duración.

Entonces, el sedimentograma unitario fue desarrollado como un sedimentograma de una tonelada para una duración dada, distribuido sobre la cuenca y análogo al hidrograma unitario de un centímetro de lluvia en exceso, sobre la misma área (72, 6).

La forma de los sedimentogramas unitarios para la cuenca de Bixler Run en Pennsylvania, U.S.A. (estudiada por el autor), variaron muy ligeramente para diferentes lluvias de una determinada duración, como lo pronostica la teoría del hidrograma unitario.

Para utilizar el sedimentograma unitario en la generación del sedimentograma para una tormenta en particular, la cantidad total de sedimento transportado o movilizado durante el evento (tormenta) debe ser conocido o estimado.

Una relación ha sido determinada por Rendon-herrero, entre la cantidad total de sedimento transportado y la lluvia en exceso de tormentas aisladas, esta relación está dada en la Fig. 4.7 de la página siguiente, para escurrimientos resultantes de aguaceros acaecidos en verano o invierno (71,5), en base a datos de la cuenca de Bixler Run, Pennsylvania, U.S.A.

Después de la estimación de la cantidad total de sedimento aportado o movilizado por el escurrimiento de la tormenta, un apropiado sedimentograma unitario sería seleccionado de acuerdo a la duración y entonces, el sedimentograma podría ser sintetizado por la multiplicación de las ordenadas unitarias por la cantidad anterior.

Sin embargo, un enfoque más simple fue adoptado y tiene la ventaja de considerar despreciable la duración del escurrimiento, pues los sedimentogramas unitarios resultaron casi independientes de la duración, en la cuenca de Bixler Run. El desarrollo matemático de este enfoque se encuentra en cualquiera de las referencias 71 y 72, donde se sugiere su consulta.

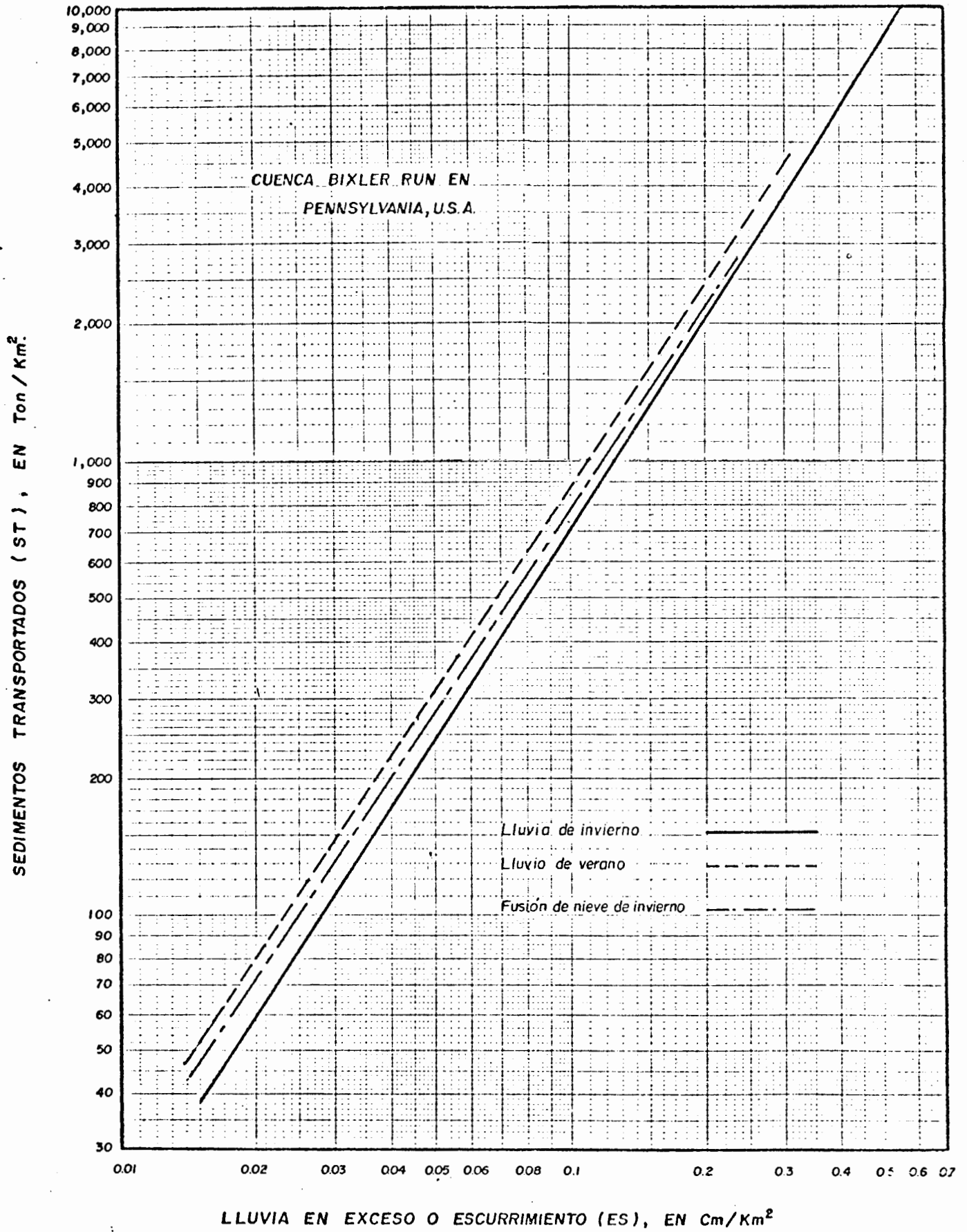
Como resultado del enfoque anterior y del análisis de los sedimentogramas obtenidos en la cuenca estudiada por el autor (Bixler Run), éste propuso una gráfica (Fig. 4.8) que relaciona las ordenadas de un único sedimentograma unitario (OSU), en  $(\text{Ton/día})/(\text{cm./Km}^2.)$ , con el escurrimiento (ES), en  $\text{cm./Km}^2.$ , para los tipos de lluvias ya citadas (de verano y de invierno) y graficadas en grupos de tiempo, referidas al tiempo de pico (P) del hidrograma de escurrimiento directo. Entonces, P+2, se refiere a un tiempo 2 horas después del pico y P-4, corresponde a un tiempo 4 horas antes del pico. Generalmente, P+6 representa la descarga de sedimentos despreciable o nula (71,7).

**4.7.2.2 PROCEDIMIENTO DE APLICACION.** Se determina para cada tormenta ocurrida durante el año en la cuenca, su lluvia en exceso o escurrimiento (ES), en  $\text{cm./Km}^2.$ , con tal valor se estima en la Fig. 4.7 siguiente, la cantidad total de sedimentos transportados o movilizados (ST) por cada aguacero, de acuerdo a su fecha de ocurrencia (verano o invierno).

La suma de los valores ST correspondientes a todas las tormentas ocurridas en el año, definirá la magnitud del transporte en suspensión de la corriente, al cual se le incrementará en un cierto porcentaje (inciso 4.7.3 siguiente), para tomar en cuenta el transporte de fondo.

Sin embargo, la construcción de los respectivos sedimentogramas y la cuantificación del material transportado en cada uno de ellos, es un método alternativo para llegar a la magnitud del transporte en suspensión y siempre debe de ser utilizado para disponer de dos resultados y concluir un valor de diseño y en seguida estimar la aportación de sedimentos de la cuenca. Por lo común, los resultados de los dos criterios siempre serán algo diferentes pues cada uno toma en cuenta dis

Fig. 4.7



tintos factores.

Una vez que ha sido aclarada la función de los dos métodos alternos de solución al problema, en la Fig. 4.8 siguiente se determinan para el valor de la lluvia - en exceso (ES), las ordenadas del sedimentograma unitario único (OSU), según la época en que se presentó la tormenta.

Al multiplicar las ordenadas (OSU) por el total de sedimentos movilizados (ST), se van obteniendo las ordenadas del sedimentograma buscado, en Ton/día, para sus tiempos respectivos, P, P±2, P±4 y P±6, en horas.

4.7.2.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL METODO. La ventaja principal de este criterio radica en su simplicidad de aplicación y en la reducida cantidad de datos requeridos, para efectuar una estimación del transporte en suspensión de la corriente.

Como consecuencia del uso de la teoría del hidrograma unitario, se aceptan la homogeneidad en el espacio y en el tiempo, y la linealidad, debido a lo cual es muy difícil usar este enfoque simple, para predecir los efectos en el manejo y protección de la cuenca (78,18).

Además, para cuencas sin datos hidrométricos puede resultar bastante difícil obtener una estimación del escurrimiento de cada tormenta, para llegar a definir - su tiempo de pico (P), en horas.

#### 4.7.3 CRITERIO PARA ESTIMAR EL TRANSPORTE DE FONDO.

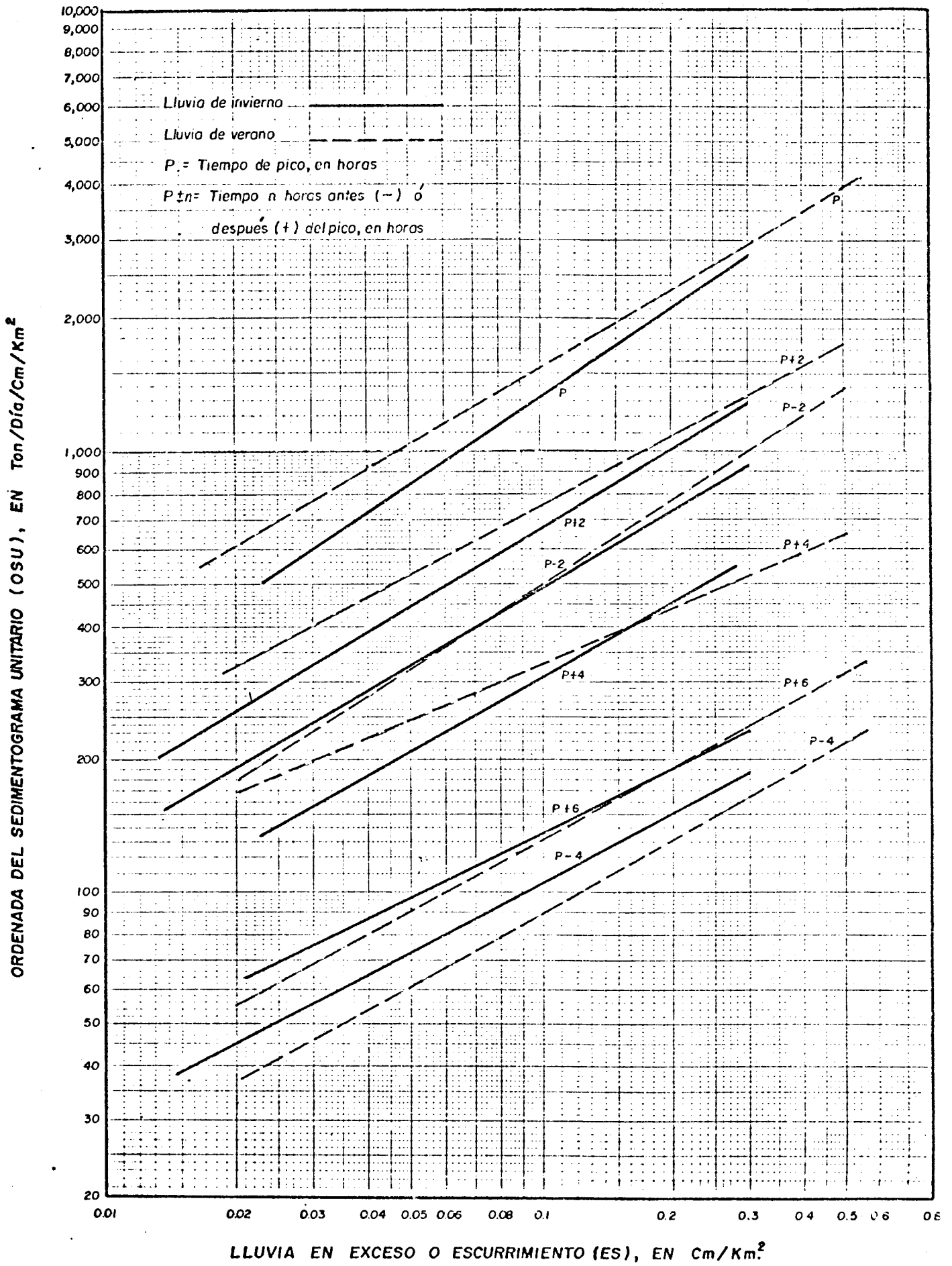
Una de las técnicas utilizadas por el U.S. Bureau of Reclamation para ayudar a predecir la aportación de sedimentos, consiste en una tabla que permite seleccionar (estimar) la cantidad de transporte de fondo como un porcentaje del transporte en suspensión, en base a varias características, dicha tabla ha sido presentada por R.I. Strand en la referencia 86, página 12 y es la siguiente.

T A B L A 4.9

MATERIAL DEL FONDO DEL CAUCE	TEXTURA DEL MATERIAL EN SUSPENSION	CONCENTRACION DEL TRANSPORTE EN SUSPENSION ( p.p.m. )	TRANSPORTE DE FONDO, EN % DEL MAT. EN SUSP.
Arcilla y Limo, no consolidados	Limo y Arcilla	Cualquier concentración	< 2
Arcilla compacta, grava, guijarros y cantos rodados *	25 % Arena o menos	> 7,500	5 a 15
A r e n a	Similar al fondo del cauce	> 7,500	2 a 8
Arcilla compacta, grava, guijarros y cantos rodados *	25 % de Arena o menos	1,000 a 7,500	5 a 12
A r e n a	Similar al fondo del cauce	1,000 a 7,500	10 a 35
Arcilla compacta, grava, guijarros y cantos rodados *	Pequeña cantidad de arena	< 1,000	5 a 12
A r e n a	Similar al fondo del cauce	< 1,000	25 a 150

\* El material del fondo puede contener uno o todos los tamaños indicados.

Fig. 4.8



#### 4.8 METODO ESTOCASTICO DE PREDICION DE LA APORTACION DE SEDIMENTOS DE UNA CUENCA.

##### 4.8.1 GENERALIDADES.

Dentro de los métodos o modelos estocásticos para estimación de la aportación de sedimentos de una cuenca, el análisis de regresión presenta un camino rápido y efectivo para obtener la solución (78,57). Sin embargo, debido a las aleatoriedades del escurrimiento y de la producción de sedimentos, los datos de entrada a la ecuación de regresión, deben ser estocásticos (78,57). Lógicamente, serán necesarios los datos hidrométricos del escurrimiento, o bien, alguna estimación de éstos a partir de los modelos o técnicas de transferencia Lluvia-Caudal.

El procedimiento que se presenta se basa en los resultados obtenidos por J.R. Williams en 1972 (100,3) y por K.G. Renard y L.J. Lane (70,1).

Williams usó los datos de 18 cuencas localizadas en los estados de Texas y Nebraska, U.S.A., concluyó que se obtenían mejores estimaciones de la aportación de sedimentos con la FUPS, si se remplazaba el factor de erosividad de la lluvia  $R$ , por un factor de escurrimiento ( $Fe$ ), evitándose además el uso del coeficiente de entrega de sedimentos (100,9). El factor de escurrimiento  $Fe$  de Williams fue definido como:

$$Fe = a (V \cdot Q_p)^b \quad (4.42)$$

entonces:

$$AS = Fe \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (4.43)$$

siendo:

$AS$  = aportación de sedimentos por cada tormenta, en toneladas.

$V$  = volumen total de escurrimiento originado por la tormenta, en  $m^3$ .

$Q_p$  = gasto de pico de la avenida o escurrimiento originado por la tormenta, en  $m^3/\text{seg}$ .

$a, b$  = constantes numéricas.

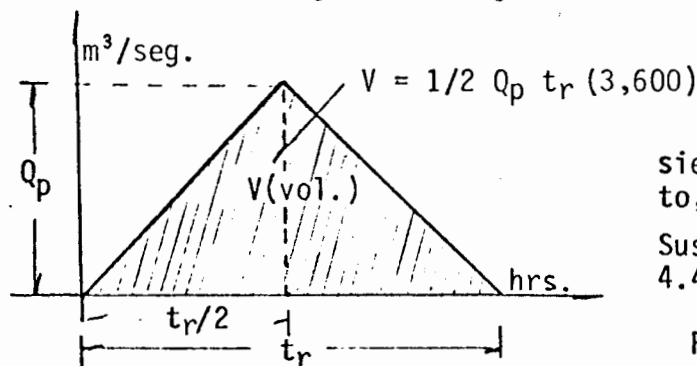
Según Williams el factor de escurrimiento es numéricamente igual a:

$$\text{en sistema métrico,} \quad Fe = 11.8 (V \cdot Q_p)^{0.56} \quad (4.42')$$

$$\text{en sistema inglés,} \quad Fe = 95.0 (V \cdot Q_p)^{0.56} \quad (4.42'')$$

##### 4.8.2 DESARROLLO TEORICO DEL METODO.

Con fines prácticos, es conveniente aproximar el gasto de pico de la avenida al obtenido en un hidrograma triangular, entonces:



$$Q_p = \frac{2V}{3,600 t_r} \quad (4.44)$$

siendo  $t_r$  la duración del escurrimiento, en horas.

Sustituyendo la ecuación 4.44 en la 4.42', se obtiene:

$$Fe = 0.1774 t_r^{-0.56} V^{1.12} \quad (4.45)$$

sustituyendo ahora la ecuación 4.45 en la 4.43, se tiene:

$$\text{en sistema métrico,} \quad AS = 0.1774 t_r^{-0.56} V^{1.12} K LS C P \quad (4.46)$$

$$\text{en sistema inglés,} \quad AS = 565.8 t_r^{-0.56} V^{1.12} K LS C P \quad (4.47)$$

En la referencia 43, se ha presentado una formulación o enfoque diferente para la evaluación del volumen (V) y del gasto de pico ( $Q_p$ ), del escurrimiento de la tormenta. Llegándose al establecimiento de un modelo para predecir la aportación de sedimentos, de acuerdo a diversas disponibilidades de datos.

En la ecuación 4.46 anterior, tanto el volumen de escurrimiento V, como su duración  $t_r$ , son variables aleatorias y el resto son todas variables calculables, de finidas anteriormente y en el Anexo I. Por simplicidad, solamente el volumen total de escurrimiento V, es considerado variable aleatoria, entonces la aportación de sedimentos AS podrá expresarse como:

$$AS = \alpha_1 V^{\beta_1} \quad (4.48)$$

Y como el volumen V no interviene en la formulación matemática, se debe de tomar  $\alpha_1$  igual a su expresión en el sistema inglés, pues no se puede transformar a sistema métrico, entonces:

$$\alpha_1 = 565.8 t_r^{-0.56} K L S C P \quad (4.49)$$

$$\beta_1 = 1.12 \quad (4.50)$$

De acuerdo a Renard y Lane, el volumen de escurrimiento V se puede considerar -- distribuido lognormalmente (70,3), o sea:

$$P_V(V) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_y V} \exp \left[ -1/2 \left( \frac{\ln V - \mu_y}{\sigma_y} \right)^2 \right]; \quad \text{para } 0 \leq V < \infty \quad (4.51)$$

Donde los parámetros, media y desviación típica poblacionales ( $\mu_y, \sigma_y$ ) serán estimados a partir de los datos hidrométricos, con  $y_i = \ln V_i$ . La variable "y" es tá distribuida normalmente, en cambio V lo está lognormalmente.

V.T. Chow en 1954, presentó las relaciones siguientes para estimar  $\mu_y$  e  $\sigma_y$  a partir de la media y desviación típica muestrales (29,107), es decir, si tener que calcular los logaritmos de los datos, éstas son:

$$\bar{y} = 1/2 \ln \left[ (\bar{V})^2 / (C_x^2 + 1) \right] \quad (4.52)$$

$$S_y = \sqrt{\ln (C_x^2 + 1)} \quad (4.53)$$

donde  $C_x$  es el llamado: Coeficiente de Variación de los datos originales ( $C_x = S_y / \bar{V}$ ).

Sustituyendo la ecuación 4.48 en la 4.51, se encuentra que la aportación de sedimentos AS por tormenta también se distribuye lognormalmente (78,59), con parámetros  $\alpha_2$  y  $\beta_2$ , esto es:

$$P_{AS}(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \beta_2 y} \exp \left[ -1/2 \left( \frac{\ln y - \alpha_2}{\beta_2} \right)^2 \right] \quad (4.54)$$

siendo:

$$\alpha_2 = \ln \alpha_1 + 8.107 \times 10^{-4} \beta_1 (\bar{y}) \quad (\text{combinación de las ecuaciones - 4.49, 4.50 y 4.52}). \quad (4.55)$$

$$\beta_2 = 8.107 \times 10^{-4} \beta_1 (S_y) \quad (\text{combinación de las ecuaciones - 4.50 y 4.53}). \quad (4.56)$$

Entonces, la aportación de sedimentos media por tormenta, será:

$$E [AS] = \int_0^{\infty} y P_{AS}(y) = \exp (\alpha_2 + \beta_2^2 / 2) \quad (4.57)$$

Por último, la aportación de sedimentos anual ( $AS_a$ ) de la cuenca, en toneladas -

métricas, si " $n_t$ " es el número promedio de tormentas por año, será:

$$AS_a = 0.972 n_t \exp (\alpha_2 + \beta_2^2/2) \quad (4.58)$$

#### 4.8.3 DATOS REQUERIDOS POR EL METODO.

Para la aplicación de este criterio estocástico, se requieren como datos los siguientes:

- 1o. Características descriptivas de la cuenca, necesarias para estimar las magnitudes de los factores K, LS, C y P de la FUPS.
- 2o. Media y desviación típica de los volúmenes escurridos, evaluadas con las ecuaciones 4.52 y 4.53 anteriores y expresadas en  $m^3$ .
- 3o. Duración promedio del escurrimiento  $t_r$  generado por las tormentas, en horas.
- 4o. Número promedio de tormentas por año,  $n_t$ .

#### 4.8.4 PROCEDIMIENTO DE APLICACION.

- Paso 1) Evaluar los factores K, LS, C y P de la FUPS, para la cuenca.
- Paso 2) Calcular  $\alpha_1$  y  $\beta_1$  a partir de las ecuaciones 4.49 y 4.50, respectivamente.
- Paso 3) Determinar las magnitudes de los parámetros  $\alpha_2$  y  $\beta_2$  de la distribución lognormal de aportaciones de sedimentos, en base a las fórmulas 4.55 y 4.56.
- Paso 4) Llevar los valores anteriores a la ecuación final del método 4.58, conjuntamente con el valor  $n_t$ .

Otro tipo de enfoque para la estimación de la aportación de sedimentos de una cuenca, se puede consultar en la referencia recomendada w.

#### 4.9 SELECCION DEL VALOR DE LA APORTACION DE SEDIMENTOS DE LA CUENCA.

Los cinco métodos presentados anteriormente para estimar la aportación de sedimentos (AS) de una cuenca, son los aplicables a aquellos casos en los que no se dispone de suficiente información para llevar a cabo dicho cálculo, debido a esto su confiabilidad es algo escasa y en cada estudio se deberán aplicar todos ellos, así como alguno o varios de los otros criterios citados en el capítulo 3, como por ejemplo, la comparación de cuencas o las mediciones en embalses existentes (batimetrías).

Después de la obtención de los diversos resultados (generalmente no iguales), se someterán éstos a un análisis crítico para concluir el posible orden de magnitud de la aportación de sedimentos de la cuenca bajo estudio.

Este análisis crítico, consistirá en dar más "peso" o importancia a los resultados de los criterios que se consideren más confiables, para obtener un valor pro medio, o uno representativo de todos ellos.



El conocimiento del hombre,  
no puede llegar más allá de  
su experiencia.

LOCKE

## CAPITULO 5: DETERMINACION DEL PESO ESPECIFICO DE LOS SEDIMENTOS DEPOSITADOS.

### 5.1 NECESIDAD DE TAL ESTIMACION.

Generalmente la evaluación de la aportación de sedimentos anual al embalse, es estimada en unidades de peso en un cierto lapso; ya sea que el cálculo se basara en los datos o registros del transporte de sedimentos (Kgs./día) o en la determinación de la pérdida de suelo de la cuenca (Kgs./Ha. o Ton/Km<sup>2</sup>/año).

Para determinar la pérdida de capacidad en el embalse debida a la depositación, es necesario convertir los pesos de sedimento a volúmenes ocupados por éstos en el vaso. Este factor de conversión es denominado PESO ESPECIFICO, PESO VOLUMETRICO o PESO UNITARIO (41,6)\* y se define como el peso seco del sedimento que ocupa un volumen unitario y se expresa en Kgs/m<sup>3</sup> ó Ton/m<sup>3</sup>.

El Committee on Sedimentation of the Hydraulics Division, ASCE. reporta que el rango de los pesos específicos de los sedimentos depositados, en base a muestras y a mediciones en embalses, varía de 480 Kgs/m<sup>3</sup> (30 Lbs/ft<sup>3</sup>) a 1,600 Kgs/m<sup>3</sup> (100 Lbs/ft<sup>3</sup>) en U.S.A. (48,6).

La determinación del peso específico de los sedimentos depositados engloba gran incertidumbre debido al enorme número de factores que influyen en ellos, como se detallará posteriormente.

### 5.2 CARACTERISTICAS GENERALES DE LOS SEDIMENTOS QUE LLEGAN A LOS EMBALSES.

#### 5.2.1 INFLUENCIA DEL TIPO DE EROSION Y DE TRANSPORTE EN LAS CARACTERISTICAS DE LOS SEDIMENTOS.

El tipo de erosión tiene un marcado efecto en el tamaño de las partículas, así por

\* Los números entre paréntesis corresponden, el primero a la clave de la referencia bibliográfica utilizada, y el segundo a la página que fue consultada.

ejemplo, la erosión laminar produce sedimentos finos, en cambio la erosión en cárcavas producirá sedimentos gruesos y hasta gravas y boleas, si estos existen en el perfil del suelo que se erosiona.

La erosión en el cauce puede producir sedimentos finos o gruesos, dependiendo de las características de los materiales de su fondo y orillas.

El transporte de los sedimentos por el agua, influye en el tamaño de las partículas en dos procesos (25,19):

1o. La selección de tamaños debido a las características hidráulicas del flujo.

2o. La abrasión.

### 5.2.2 CARACTERISTICAS GENERALES DE LOS SEDIMENTOS DEPOSITADOS.

Debido a la gran variedad y a la complejidad de los procesos que llevan el sedimento hasta los embalses, estos presentan un enorme rango de tamaños al ser atrapados por los embalses.

L.M. Glymph en un estudio que abarcó 113 cuencas cuyas áreas variaron entre 0.26 y 1,131 Km<sup>2</sup> y localizadas en zona húmeda, encontró que en más del 50% de ellas, el 90% o más de la aportación de sedimentos provenía de la erosión laminar (24,4).

### 5.3 FACTORES GENERALES QUE INFLUYEN EN LA DETERMINACION DEL PESO ESPECIFICO DE LOS SEDIMENTOS.

Existen numerosos factores que determinan el peso específico de los sedimentos depositados. J.M. Lara y E.L. Pemberton puntualizaron que los más importantes son (56,1):

1. La manera en la cual el embalse es operado. Parámetro que engloba la profundidad de los sedimentos y su grado de sumergencia o exposición al aire libre (41,7).
2. El tamaño y textura de los sedimentos.
3. La velocidad de compactación o consolidación de los sedimentos depositados.
4. Otros factores menos importantes son: la acción de las corrientes de densidad, las pendientes de las corrientes que afluyen al vaso y la acción de la vegetación al inicio del área del embalse.

Probablemente el factor que más influencia tiene es la operación del embalse. Los sedimentos que son depositados en vasos sujetos a considerables descensos de nivel, están expuestos a largos períodos al aire libre, por cuya circunstancia se secan y se consolidan enormemente, aumentando su peso específico (85,12) mismo que no volverá a su valor primitivo al ser nuevamente sumergidos en las aguas (47,297).

El tamaño de las partículas del sedimento que llega al vaso, tiene un efecto significativo en el peso específico, por ejemplo, los sedimentos compuestos de arena y limo tienen un mayor peso que aquellos compuestos predominantemente por arcillas.

Una clasificación del sedimento de acuerdo a su tamaño ha sido propuesta por la American Geophysical Union (85,11), siendo ésta una de las más aceptadas:

TABLA 5.1

Tipo de sedimento:	Rango de tamaños, en mm.
Arena	2.00 a 0.0625
Limo	0.0625 a 0.0040
Arcilla	menor a 0.0040

De acuerdo a la anterior clasificación se ha convenido en llamar Sedimento GRUESO a aquellos materiales que tienen más del 50% de partículas mayores a 0.0625 mm., y Sedimento FINO, a los materiales con más del 50% de granos menores a --- 0.0625 mm. (25,15).

Por último, la distribución granulométrica tiene otro efecto importante a tomar en cuenta, pues por ejemplo, las arenas y las gravas rápidamente alcanzan la máxima consolidación, en cambio los sedimentos finos requieren mucho tiempo para llegar a la máxima compactación.

#### 5.4 CRITERIOS QUE SE PRESENTAN.

##### 5.4.1 INTRODUCCION.

De todo lo expuesto anteriormente, se puede concluir que el peso específico de los sedimentos depositados se incrementa cada año que permanecen en el embalse, debido a la consolidación que ellos sufren.

Los criterios para la estimación del peso volumétrico de los sedimentos depositados son todos empíricos y por lo tanto, sus resultados tienen que tomarse con reservas, los que se exponen son:

- I. Tabla de pesos específicos.
- II. Criterio de E.W. Lane y V.A. Koelzer.
- III. Criterio de C.R. Miller.
- IV. Método de J.M. Lara y E.L. Pemberton, para estimación del peso específico inicial de los sedimentos.
- V. Criterios de W.F. Megahan.

##### 5.4.2 TABLA DE PESOS ESPECIFICOS PROMEDIO.

La parte del sedimento que llega al embalse y es depositado en un ambiente de completa sumersión, es llamado SUMERGIDO. En cambio los depósitos arriba del nivel del vertedor están sujetos a un alternado secado y mojado, denominándose -- AIREADOS. Los términos sumergido y aireado corresponden a embalses con fines de riego o de abastecimiento de agua potable y a estructuras o vasos de control de avenidas, respectivamente (81,4-6).

La distinción entre sedimentos sumergidos y aireados es importante pues cada -- uno ocupa volúmenes diferentes. Los siguientes valores son utilizados por el U.S. Soil Conservation Service como una guía cuando no existen mediciones en campo (-81,4-6):

TABLA 5.2

Tamaño de los granos:	Peso Específico, en Kgs/m <sup>3</sup>	
	sumergido	aireado
Arcilla.	480-960	960-1,280
Limo.	880-1,200	1,200-1,360
Mezcla Arcilla-Limo.*	640-1,040	1,040-1,360
Mezcla Limo-Arena.*	1,200-1,520	1,520-1,760
Mezcla Arcilla-Limo-Arena.*	800-1,280	1,280-1,600
Arena.	1,360-1,600	1,360-1,600
Grava.	1,360-2,000	1,360-1,600
Arena mal graduada y grava.	1,520-2,080	1,520-2,080

\* en partes iguales.

NOTA: como se observa en la TABLA 5.2 anterior el peso específico nunca es igual a la densidad, porque siempre existirán vacíos en el sedimento (48,6).

#### 5.4.3 CRITERIO DE E.W. LANE Y V.A. KOELZER.

Lane y Koelzer, en base a mediciones en embalses, presentaron en 1943 una ecuación para estimar el peso específico de los sedimentos depositados, tomando en cuenta el tamaño de las partículas de los sedimentos, la forma de operación del vaso y el tiempo transcurrido en años (93,2-10). La ecuación es:

$$W_T = W_1 + K \log (T-1.0) \quad (5.1)$$

donde:

$W_T$  = peso específico del sedimento después de T años en el embalse, en Kg./m<sup>3</sup>.

$W_1$  = Peso específico inicial, usualmente considerado igual al valor obtenido -- después de un año de consolidación, en Kg./m<sup>3</sup>.

K = constante que toma en cuenta la consolidación.

Cuando el sedimento está compuesto por una mezcla de materiales, entonces la -- ecuación 5.1 se transforma (93,2-10) en:

$$W_T = W_1 X_1 + (W_2 + K_2 \log t)X_2 + (W_3 + K_3 \log t)X_3 / 100 \quad (5.2)$$

siendo:

$W_1, W_2, W_3$  = pesos específicos iniciales para la arena y material grueso (1), - limo (2) y arcilla (3), en Kg./m<sup>3</sup>.

$K_1, K_2, K_3$  = constantes de consolidación para la arena ( $K_1 = 0$ ), limo y arcilla, respectivamente.

$X_1, X_2, X_3$  = porcentajes de cada material en la muestra.

t = tiempo en años, igual a (T - 1.0).

En la TABLA 5.3 siguiente se tienen los valores de  $W_i$  y  $K_i$  para cada material y los diferentes tipos de embalses, según los autores (45,343).

TABLA 5.3

Condiciones del Embalse.	ARENA		LIMO		ARCILLA	
	$W_1$	$K_1$	$W_2$	$K_2$	$W_3$	$K_3$
Sedimentos siempre sumergidos.	1,490	0	1,040	91.3	480	256.0
Embalse moderadamente vacío.	1,490	0	1,185	43.2	737	171.4
Embalse considerablemente vacío.	1,490	0	1,265	16.0	961	96.1
Embalse normalmente vacío.	1,490	0	1,314	0	1,249	0

NOTA:  $W_1, W_2$  y  $W_3$ , están en Kg./m<sup>3</sup>.

#### 5.4.4 CRITERIO DE C.R. MILLER.

En el método de Lane y Koelzer, la constante K fue introducida para determinar el peso específico del sedimento depositado, después de un período de operación del embalse. Sin embargo, parte de los sedimentos que se depositarán en el vaso en ciertos T años y los ya existentes en ese período, tendrán diferentes tiempos de consolidación.

Miller (1963), por integración de la ecuación de Lane y Koelzer con respecto al --

tiempo, obtuvo el peso promedio de los sedimentos en el embalse después de T años de operación, durante los cuales los depósitos se acumularon a ritmo uniforme (-85,13). La ecuación encontrada fue:

$$W_T = W_1 + 0.4343 K \left[ \frac{T}{T-1} (\ln T) - 1 \right] \quad (5.3)$$

donde:

$W_T$  = peso específico promedio después de T años de operación del embalse, en Kg./m<sup>3</sup>.

$W_1$  = peso específico inicial obtenido con el criterio de Lara y Pemberton (siguiente inciso), en Kg./m<sup>3</sup>.

K = constante basada en el tipo de operación del vaso y en el tamaño del sedimento, obtenida de la TABLA 5.4 siguiente.

TABLA 5.4

Tipo de embalse.	Valores de K:		
	ARENA	LIMO	ARCILLA
Sedimentos siempre sumergidos.	0	91.3	256.3
Embalses normalmente a considerablemente vacíos.	0	28.8	134.6
Embalses normalmente vacíos.	0	0	0

#### 5.4.5 METODO DE J.M. LARA Y E.L. PEMBERTON PARA ESTIMACION DEL PESO ESPECIFICO INICIAL DE LOS SEDIMENTOS.

Basándose en los pesos específicos y distribución de tamaños de 1,316 muestras recolectadas de los sedimentos depositados en embalses de U.S.A., Lara y Pemberton en 1965 desarrollaron un método para estimar el Peso Específico Inicial de los sedimentos, cuando el análisis de los tamaños del sedimento y el tipo de operación del embalse son conocidos (85,12). La fórmula propuesta fue:

$$W_1 = w_1 X_1 + w_2 X_2 + w_3 X_3 \quad (5.4)$$

en donde:

$w_1, w_2$  y  $w_3$  = pesos específicos para arena, limo y arcilla, respectivamente. Tomados de la TABLA 5.5 siguiente, en Kg./m<sup>3</sup>.

$X_1, X_2$  y  $X_3$  = porcentajes de arena, limo y arcilla, respectivamente, del sedimento que entra al vaso.

TABLA 5.5

Tipo de Embalse.	ARCILLA ( $w_1$ )	LIMO ( $w_2$ )	ARENA ( $w_3$ )
Sedimentos siempre sumergidos.	416	1,120	1,552
Embalses moderadamente a considerablemente vacíos.	560	1,136	1,552
Embalses normalmente vacíos.	640	1,152	1,552
Sedimentos del fondo de los ríos.	960	1,168	1,552

Por otra parte, el U.S. Bureau of Reclamation (41,8) utiliza los criterios de Lane y Koelzer y de Miller ya descritos, pero considera que los valores del peso específico inicial ( $W_1$  o  $w_1$ ) son demasiado altos y prefiere utilizar usar -- los determinados por P. Trask, estos son:

TABLA 5.6

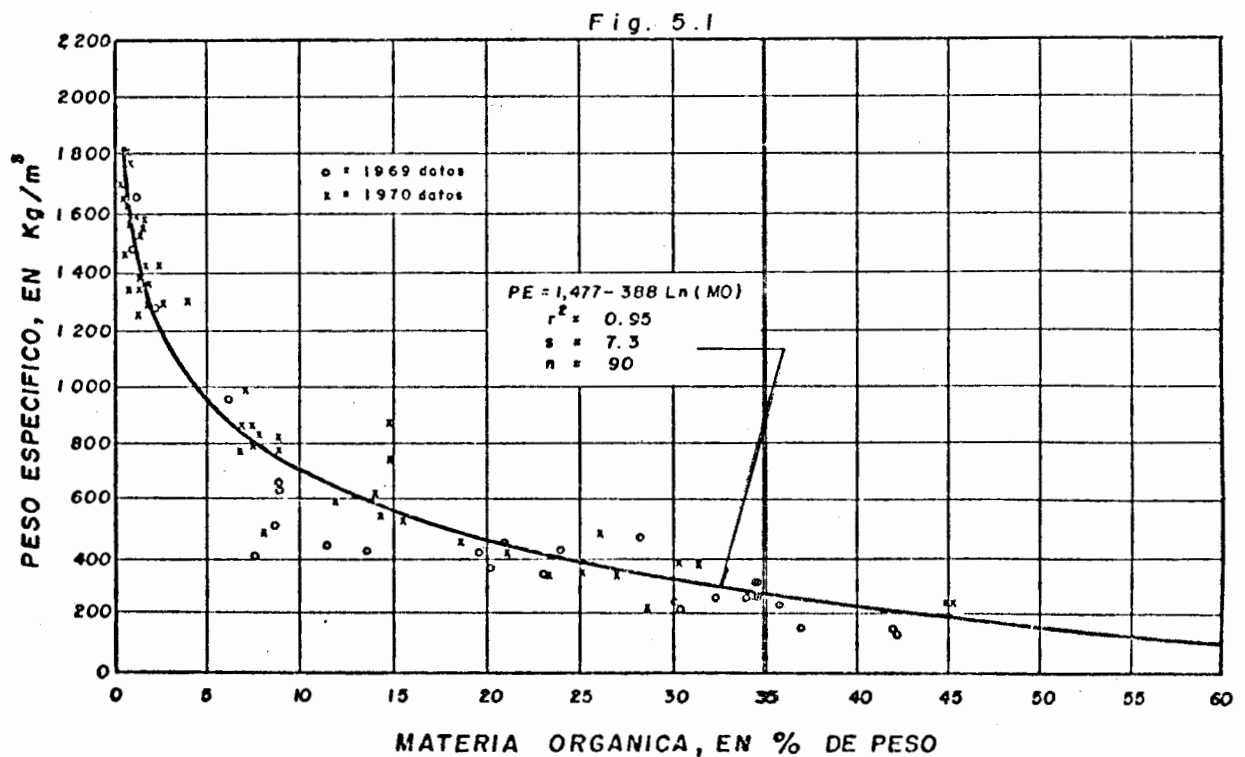
Tipo de material.	Rango de Tamaños, en mm.	$W_1$ Kg./m <sup>3</sup> .
ARENA	0.5 - 0.25	1,424
ARENA	0.25 - 0.125	1,424
ARENA	0.125 - 0.064	1,376
LIMO	0.064 - 0.016	1,264
LIMO	0.016 - 0.004	880
LIMO	0.004 - 0.001	368
ARCILLA	menor a 0.001	48

#### 5.4.6 CRITERIOS DE W.F. MEGAHAN.

Megahan en 1972, presentó dos nuevos enfoques en la estimación del peso específico de los sedimentos depositados en pequeños embalses con cuencas forestales, pues concluyó que las variaciones, en los pesos volumétricos, no podían ser explicadas en base a los métodos convencionales que las relacionan con los tamaños de las partículas (56,5).

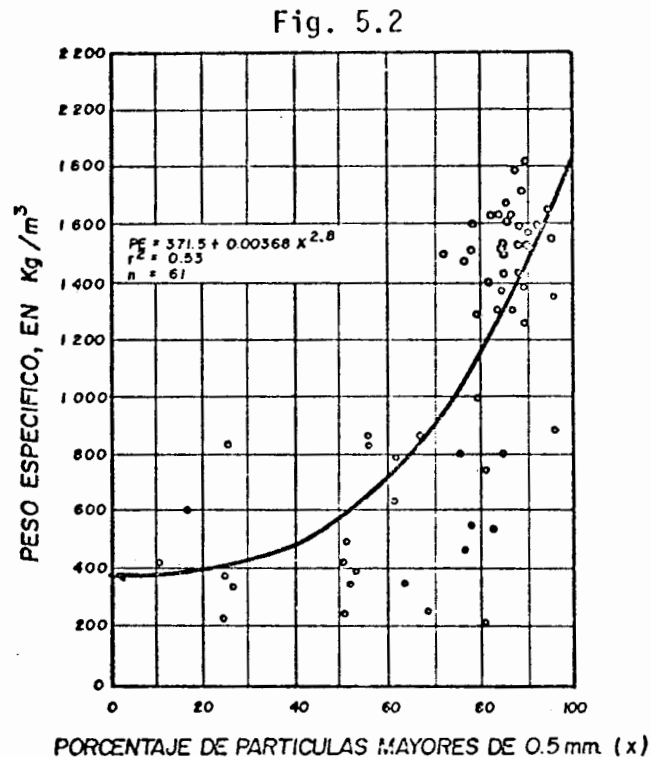
Según Megahan, el porcentaje de materia orgánica del sedimento (en % del peso de la muestra) proporciona una base más confiable para estimar el peso específico, mejor que los enfoques tradicionales que lo relacionan con el análisis de tamaños del sedimento (56,7).

En la Fig. 5.1 siguiente, se muestran los resultados encontrados para 12 cuencas en el Estado de Idaho (Batholith) de 0.26 a 6.5 Km<sup>2</sup>, para los años de 1969 y 1970.



El otro enfoque consistió en usar el porcentaje de partículas mayores que 0.50 mm. para predecir el peso específico del sedimento, pero la correlación fue obviamente menor ( $r = 0.73$  contra  $r = 0.97$ ) que la obtenida usando el porcentaje de materia orgánica.

Los resultados se muestran en la Fig. 5.2 siguiente (56,6).



### 5.5 RECOMENDACIONES PARA LA APLICACION DE LOS CRITERIOS EXPUESTOS.

De los cinco métodos expuestos para estimar el peso volumétrico de los sedimentos depositados, cuatro se basan en la distribución granulométrica de los materiales que llegan al vaso, por lo tanto, es sumamente importante disponer de muestras sobre los sedimentos que transportan las corrientes que afluyen al embalse, para determinar en el laboratorio su granulometría.

Además, se requiere conocer de la manera más precisa posible la forma en la cual operará el embalse, esto es, su propósito, régimen de explotación, posibles fluctuaciones de nivel, que llevan consigo el grado de sumergencia o aireación de los sedimentos, etc.

Con la información anterior, se podrán aplicar rigurosamente los criterios presentados, a fin de obtener resultados confiables y congruentes.

Por otra parte, el criterio propuesto por W.F. Megahan ofrece una nueva perspectiva de estudio e investigación, pues cambia radicalmente de enfoque al utilizar el contenido de materia orgánica en peso como variable independiente.

Los resultados obtenidos por Megahan son bastante alentadores, siempre y cuando este método se aplique a sedimentos con texturas medias y finas, procedentes de cuencas forestales.

Lo que caracteriza al hombre de ciencia, no es la posesión del conocimiento o de verdades irrefutables, sino la investigación desinteresada e incesante de la verdad.

KARL POPPER

## CAPITULO 6: ESTIMACION DE LA EFICIENCIA DE RETENCION DEL EMBALSE.

### 6.1 GENERALIDADES.

Del total de sedimentos que entran al vaso por las corrientes, solamente una parte puede ser atrapada y retenida en el embalse y el resto lo sobrepasa. La "habilidad" de un embalse para atrapar y retener sedimentos es conocida como EFICIENCIA DE RETENCION (25,21)\*.

La eficiencia de retención es definida como el cociente entre la cantidad de sedimentos depositados y el total de materiales que llegó al embalse (48,4), es decir, es un porcentaje del sedimento total aportado que quedó retenido en el vaso.

El Task Committee for Preparation of Manual on Sedimentation (ASCE), señala que en grandes embalses, probablemente aquéllos con capacidades mayores de 12.3 Hm<sup>3</sup>. (--- 10,000 acres-ft), puede ser adoptada como eficiencia de retención un 100%, porque prácticamente todos los sedimentos que entren al vaso permanecerán ahí (89,1).

Aunque puede ser que los sedimentos se muevan por el fondo del embalse en corrientes de densidad y/o durante los períodos de avenidas, y entonces sean eliminados del vaso por las descargas, sin embargo, tomando en cuenta la aproximación con la cual se estima la aportación de sedimentos, es mejor ignorar estas eliminaciones de materiales y tener así un pequeño factor de seguridad.

En pequeños embalses normalmente secos, la mayoría del sedimento que llega al vaso es transportado fuera de éste; esto puede ocurrir durante las avenidas cuando el vertedor descarga y existe entonces una apreciable velocidad del flujo a través del vaso y ya que las partículas finas (limos y arcillas) permanecen en suspensión y no serán retenidas por el vaso.

La pérdida de capacidad anual de un embalse debida a la depositación de los sedimentos dentro del vaso, puede ser expresada (79,750) como:

$$C_L (C) = ER (DE) \quad (6.1)$$

\* El primer número indica la referencia bibliográfica utilizada y el segundo su página consultada.



donde:

$C_L$  = pérdida de capacidad del embalse, en % por año.

$C$  = capacidad original o inicial del vaso, en  $Hm^3$ .

ER = eficiencia de retención, en %.

DE = aportación anual de sedimentos, en  $m^3/año$ .

Entonces:

$$C_L = \frac{(ER) DE}{C} \quad (6.2)$$

Una predicción confiable de la vida probable del embalse es sumamente importante, ya que ésta tiene influencia directa en la economía del proyecto (79,752). Sin embargo, el criterio anterior ya no es utilizado debido a la poca exactitud -- que brinda, sino que se simula la pérdida de capacidad del vaso (inciso 4 siguiente).

## 6.2 FACTORES QUE DETERMINAN SU MAGNITUD.

La eficiencia de retención de un embalse depende de un gran número de factores. A continuación se describen brevemente los principales.

### 6.2.1 CARACTERISTICAS DE LOS SEDIMENTOS.

La eficiencia de retención de un vaso depende enormemente de las características -- del sedimento y de la cantidad de flujo que circula por el embalse. La cantidad de material que puede pasar a través del embalse depende primeramente de la velocidad de caída de las partículas y de la cantidad de ellas que pueden ser transportadas. Por otra parte, la velocidad de caída depende del tamaño y forma de las partículas y de la viscosidad y composición química de las aguas del vaso (25,21).

### 6.2.2 TIEMPO DE PERMANENCIA DEL ESCURRIMIENTO EN EL EMBALSE.

El tiempo que las aguas permanezcan en el embalse, es función de la cantidad de -- flujo que entra, de la capacidad de la presa y de la magnitud de extracciones y de rramas. A este respecto, el propósito del embalse es un factor muy importante en -- la magnitud de la retención, esto es, los embalses para riego o suministro de --- agua potable almacenan el escurrimiento por meses, y por lo tanto, la depositación podrá ser prácticamente total. En cambio, los embalses para control de avenidas -- pueden vaciarse en pocos días, entonces, la depositación será sólo parcial de los elementos más pesados (47,301). El efecto de la permanencia del escurrimiento en -- el vaso, ha sido tomado en cuenta últimamente en las estimaciones de la eficiencia de retención, por la relación capacidad total-escurrimiento medio anual.

### 6.2.3 NATURALEZA DE LAS OBRAS DE TOMA.

El tamaño de las obras de toma tiene efecto en el tiempo de permanencia del escu-- rrimiento y la localización de ellas influye en cuanto al gasto descargado de agua y sedimentos; con respecto a lo anterior serán mucho más efectivas las profundas -- en dar paso a los sedimentos, pues las mayores concentraciones de material se tien-- nen en los fondos de los vasos.

### 6.2.4 OTROS FACTORES.

Otros factores que influyen en la eficiencia de retención son: la forma y la anti-- güedad del embalse, el método o forma de operación, etc. (9,1).

## 6.3 CRITERIOS PARA LA ESTIMACION.

### 6.3.1 GENERALIDADES.

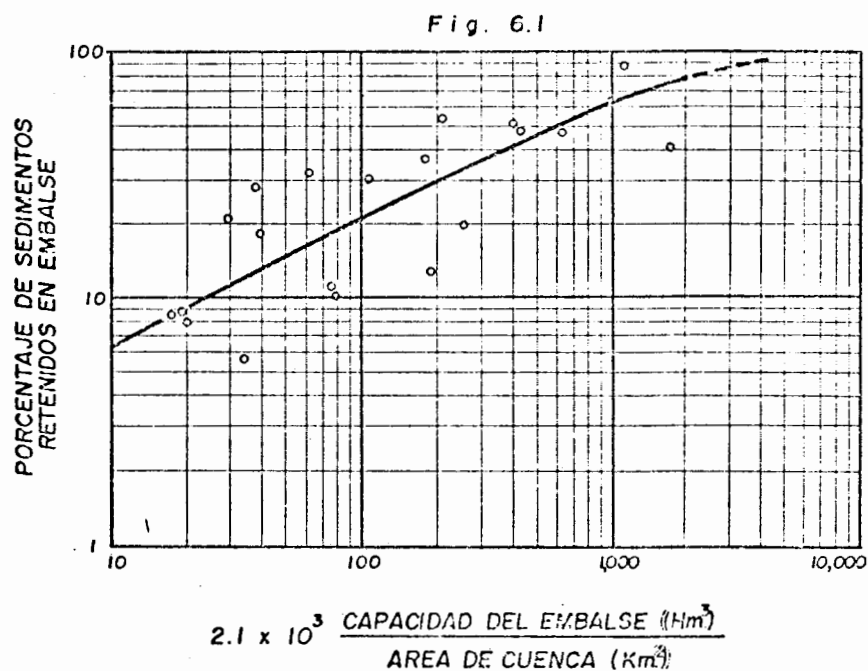
Un gran número de intentos han sido efectuados para correlacionar la eficiencia de retención con uno o más de los factores descritos. Los métodos o criterios disponi-- bles son todos empíricos, basados en las mediciones de los depósitos en un gran nú-- mero de embalses. Los que se presentan son los cinco siguientes:

- 1o. Criterio de G.M. Brune y R.E. Allen (1941).
- 2o. Criterio de C.B. Brown (1943).
- 3o. Criterio de M.A. Churchill (1948).
- 4o. Criterio de G.M. BRUNE (1953).
- 5o. Criterio de A.V. Karashev (1966).

### 6.3.2 CRITERIO DE G.M. BRUNE Y R.E. ALLEN.

Inicialmente, el cociente entre la capacidad del embalse y el escurrimiento fue expresada o considerada en forma general por la relación capacidad-cuenca ---- (C/A).

Uno de los primeros estudios sobre la eficiencia de retención fue desarrollado por Brune y Allen en 1941 (9,2), el cual se concentra en la Fig. 6.1 siguiente - (46,354).



### 6.3.3 CRITERIO DE C.B. BROWN.

Brown en 1943, desarrolló una curva relacionando C/A (capacidad-área de cuenca) y la eficiencia de retención (ER). La curva mostrada en la Fig. 6.2 de la página siguiente (con registros adicionales), está representada por la ecuación (9,2):

$$ER = 100 \left[ 1 - \frac{1}{1 + K 2.1 \times 10^3 (C/A)} \right] \quad (6.3)$$

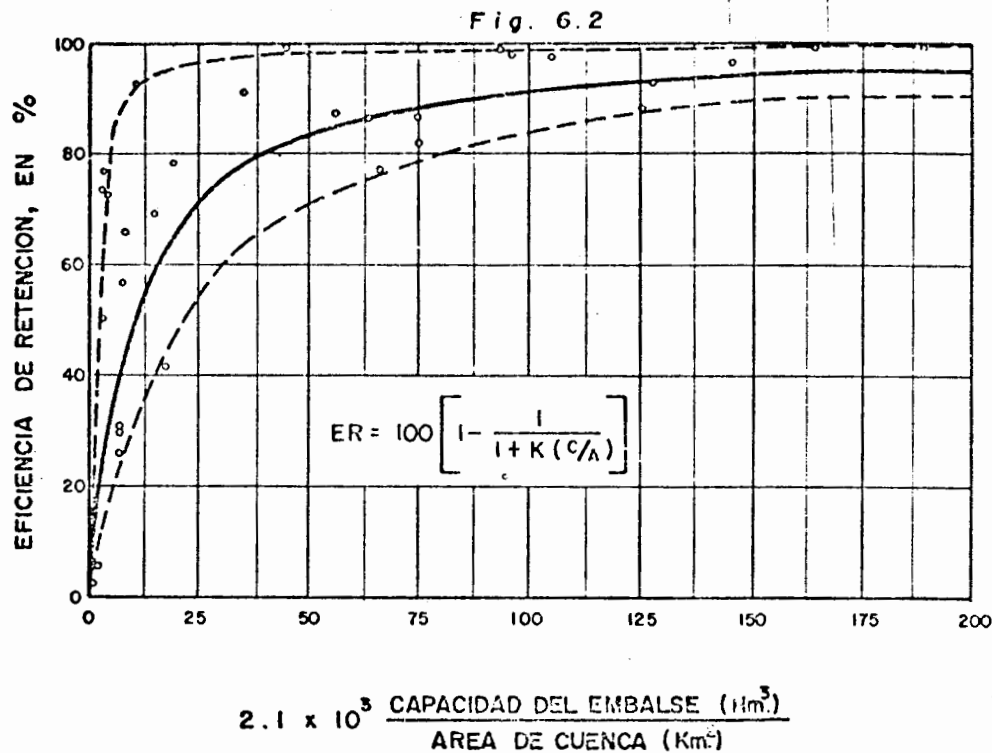
siendo:

C = capacidad total del embalse, en Hm<sup>3</sup>.

A = área de cuenca, en Km<sup>2</sup>.

K = coeficiente numérico, con los valores siguientes: 0.046 para la curva envolvente inferior, 1.00 para la curva envolvente superior y un valor de 0.100 para la curva de diseño (8,59).

La separación entre las dos curvas envolventes, es debida al efecto preponderante de alguno o varios de los otros factores en la eficiencia de retención, pues como el término C/A es una constante, teóricamente dos embalses con igual va-



lor de C/A deberán de tener la misma eficiencia de retención, lo cual no sucede. La curva envolvente superior se recomienda para embalses con alguna de las características siguientes (8,59):

- 1a. Localizado en regiones de reducido y variable escurrimiento.
- 2a. De longitud y forma tal que incremente el tiempo de permanencia del escurrimiento.
- 3a. Cuando el transporte de material sólido es primordialmente grueso o altamente coagulado.
- 4a. Donde las obras de toma y la política de operación sólo liberan pequeños volúmenes de agua del fondo del vaso y el embalse retiene largo tiempo el escurrimiento de las avenidas.

#### 6.3.4 CRITERIO DE M.A. CHURCHILL.

Churchill en 1948, usando datos recolectados en los embalses de Tennessee Valley Authority (TVA) desarrolló un método para estimar la eficiencia de retención, el cual toma en consideración el tiempo de permanencia o de retención y la velocidad de flujo a través del vaso (5,7).

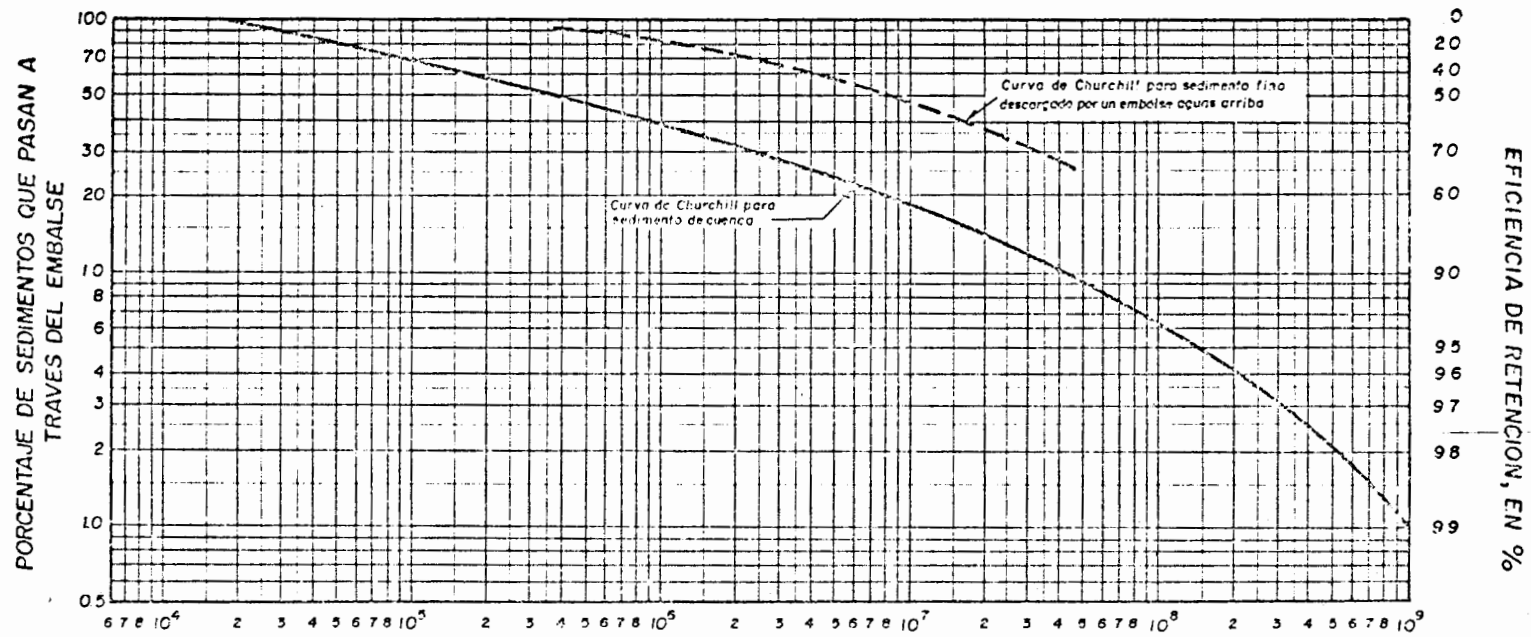
El criterio se basa en una gráfica logarítmica (Fig. 6.3 página siguiente), que relaciona la eficiencia de retención con el denominado "Índice de Sedimentación", que se define como la relación entre el período de retención y la velocidad media del flujo a través del embalse (9,4).

Los siguientes términos y conceptos son útiles al aplicar el criterio de Churchill, según W.M. Borland (5,7):

**CAPACIDAD (C):** es la capacidad del embalse correspondiente al nivel medio de operación durante el período considerado, en m<sup>3</sup>.

Fig. 6.3

CURVA DE EFICIENCIA DE RETENCION DE M. A. CHURCHILL



$$\text{INDICE DE SEDIMENTACION DEL EMBALSE} = \frac{\text{PERIODO DE RETENCION}}{\text{VELOCIDAD MEDIA}}$$

**GASTO o APORTACION (I):** es el gasto promedio diario durante el período de estudio (comúnmente un año), en  $m^3/seg.$

**PERIODO DE RETENCION (PR):** es el cociente de la capacidad (C) entre el gasto (I), en segundos.

**LONGITUD (L):** es la longitud del vaso en el nivel promedio de operación, en m.

**AREA PROMEDIO TRANSVERSAL DEL VASO (A):** se obtiene dividiendo la capacidad (C) - entre la longitud (L).

**VELOCIDAD (V):** es igual al gasto (I) dividido entre el área promedio transversal del vaso (A), en m/seg.

**INDICE DE SEDIMENTACION (IS):** es igual al período de retención (PR) entre la velocidad (V).

Con el valor del índice de sedimentación se obtiene en la Fig. 6.3 anterior, el valor de la eficiencia de retención.

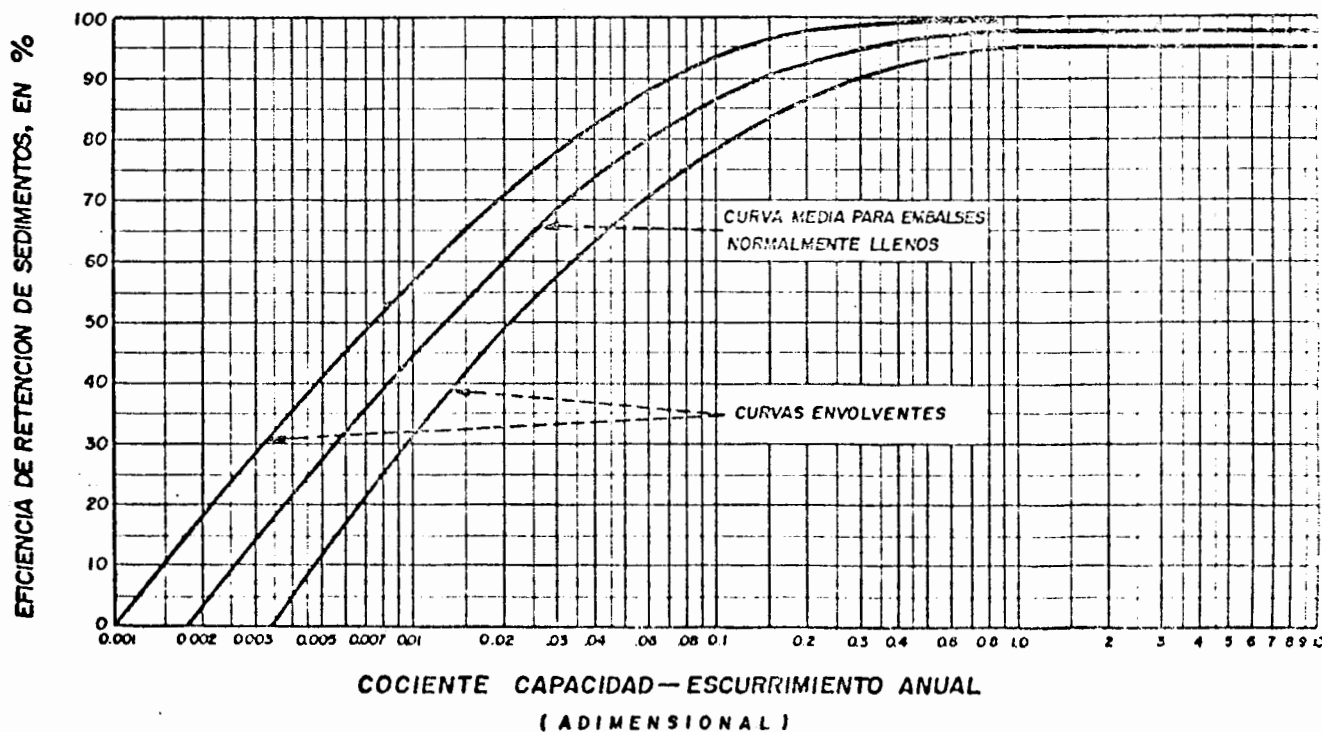
El U.S. Bureau of Reclamation adicionó a la gráfica de Churchill los valores correspondientes a embalses semisecos y de retención de sedimentos, encontrando que éstos seguían la tendencia de la curva del autor, y concluyendo por lo tanto, -- que el criterio de Churchill es mucho más aplicable que los otros, en la estimación de la eficiencia de retención para los tipos de embalses citados (5,7).

#### 6.3.5 CRITERIO DE G.M. BRUNE.

Basándose en 44 datos de embalses normalmente llenos, Brune construyó en 1953 -- unas curvas para relacionar el cociente entre la capacidad total del embalse y -- el escurrimiento medio anual (ambos con las mismas unidades), y la eficiencia de retención (9,8). Los resultados de Brune se concentran en la Fig. 6.4 siguiente.

Fig. 6.4

#### CURVA DE EFICIENCIA DE RETENCION DE G.M. BRUNE



Como se observa en la Fig. 6.4 anterior, se tienen dos curvas envolventes y una central de diseño para embalses normalmente llenos, es decir, el criterio de Brune no se debe aplicar a embalses semisecos, de retención de sedimentos, o a estructuras de control de avenidas.

Posteriormente, el criterio de Brune recibió una adaptación práctica, citada por diversos autores, como Szechowycz y Qureshi (87,16) los cuales sugieren que la curva envolvente superior sea utilizada para sedimento compuesto de partículas gruesas o finas altamente floculadas y la curva envolvente inferior para sedimento de granos finos y coloidal disperso, en cambio la curva central es para sedimentos medios.

#### 6.3.6 CRITERIO DE A.V. KARASHEV.

Este autor derivó en 1966 una ecuación analítica para el cálculo de la eficiencia de retención en embalses pequeños (48,5), esta es:

$$ER = 1 - (1 - \omega) e^{\frac{-\phi \omega}{1-\omega}} \quad (6.4)$$

ER = eficiencia de retención, en decimal.

$\omega$  = relación capacidad-escorrimento medio anual, adimensional.

$\phi$  =  $U Ts / Hres$ , parámetro que relaciona las características del sedimento transportado, del flujo y del vaso.

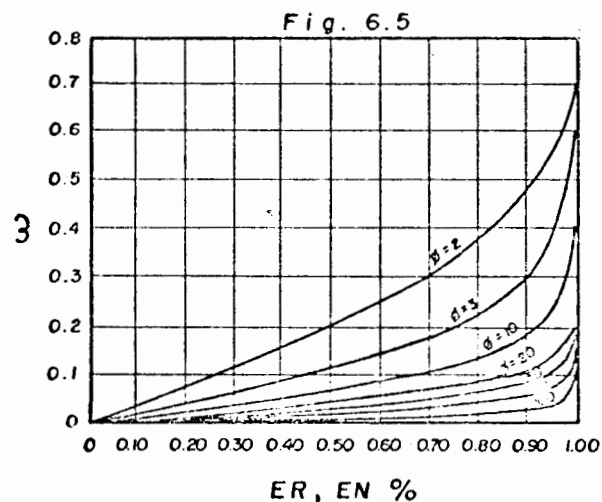
U = velocidad media de caída del sedimento transportado, en m/seg.

Ts = duración del período de descarga sobre el vertedor, en segundos.

Hres = valor medio del tirante en el embalse, en metros.

Karashev indicó que cuando  $\phi$  es constante su ecuación corresponde a las curvas empíricas de Brune y se tiene la mejor correspondencia cuando  $\phi = 30$ .

Para facilitar el cálculo la ecuación 6.4 se tiene desarrollada en forma de gráfica en la Fig. 6.5 siguiente.



La velocidad media de caída del sedimento transportado se obtiene por la fórmula siguiente (n,2.7):

$$U = \frac{\sum \omega_j p_j}{100} \quad (6.5)$$

donde:

$p_j$  = intervalo constante o no, de material no retenido en que se divide la curva granulométrica, en %

$\omega_j$  = velocidad de caída para el diámetro  $D_j$ .

$D_i$  = diámetro medio que corresponde al intervalo  $p_i$ .

### 6.3.7 OTROS CRITERIOS.

W.M. Borland desarrolló en 1971 otro criterio para evaluar la eficiencia de retención en base a las experiencias de H.A. Einstein, este método puede ser encontrado en (5,7).

Por otra parte, W.A. Thomas (1977) en (93,5-10) reporta un criterio para el cálculo de la depositación de sedimentos en el almacenamiento para control de avenidas, en un embalse con propósitos de control.

En la India, The Central Water and Power Commission (65,4) ha propuesto un método para estimar la cantidad de sedimentos que serán retenidos o atrapados por los embalses. Primeramente se clasifican los sedimentos dentro de tres grandes rangos y se les asigna un porcentaje de "eficiencia de depositación (ED)", estos son:

- 1er. Grupo: Sedimentos GRUESOS (partículas mayores a 0.20 mm) con 90 a 100% de ED. y lógicamente TODO el transporte de fondo.
- 2o. Grupo: Sedimentos MEDIANOS (partículas con tamaños entre 0.20 y 0.075 mm.) con 80 a 90% de ED.
- 3er. Grupo: Sedimentos FINOS (partículas más pequeñas que 0.075 mm.) con ED, entre 0 y 5%.

Lógicamente, los valores mayores de la ED serán utilizados en grandes embalses y viceversa.

## 6.4 SIMULACION DE LA PERDIDA DE CAPACIDAD DEL EMBALSE DEBIDO A LA SEDIMENTACION.

### 6.4.1 EN BASE A LA EFICIENCIA DE RETENCION.

Frecuentemente la magnitud y velocidad de depositación en el embalse, determina la vida útil de tal proyecto (14,116).

Al simular la pérdida de capacidad de un embalse debido a la sedimentación, teóricamente la eficiencia de retención decrecería progresivamente con la pérdida de almacenamiento del vaso, sin embargo, no es práctico analizar la simulación para períodos menores a 10 años, por los errores que se pueden inducir. (85,11).

Para efectuar lo anterior, se construye una tabulación cuyas columnas se describen a continuación (44,206), según la FORMA DE CALCULO 6.1 de la página siguiente.

#### DATOS:

Area de cuenca (A), en  $Km^2$ .

Capacidad Total inicial (C), en  $Hm^3$ .

Escorrentamiento Promedio anual (E), en  $Hm^3$ .

Aportación anual de sedimentos (AS), en Toneladas o en  $m^3$ .

Capacidad Final del embalse, es decir, cuando el embalse esté prácticamente lleno de sedimentos, comúnmente es el 80% de la capacidad total inicial, en  $Hm^3$ .

COLUMNA 1: Capacidades, en  $Hm^3$ .

Se restan incrementos generalmente constantes a la capacidad inicial, hasta llegar a la capacidad final definida.

COLUMNAS 2, 3 y 4: Relaciones C/E, C/A e Índice de Sedimentación.

Cada una de las capacidades adoptadas en la col.1 se dividen entre el escorrentamiento promedio anual, entre el área de cuenca, y se le calcula el índice de sedimentación.

COLUMNA 5: Estimación de la eficiencia de retención.

A partir de los datos de las columnas 2,3 y 4, se estiman las eficiencias de retención con los diferentes criterios.

(Forma de Cálculo 6.1)

# SIMULACION DE LA PERDIDA DE CAPACIDAD POR SEDIMENTACION

Proyecto : \_\_\_\_\_ Mpio. : \_\_\_\_\_ Edo. : \_\_\_\_\_ Calculó : \_\_\_\_\_

Aportación medio anual de sedimentos : \_\_\_\_\_ m<sup>3</sup> Fecha : \_\_\_\_\_

PUNTO No.	CAPACIDAD C (Hm <sup>3</sup> )	RELACION C/E	RELACION C/A (Hm <sup>3</sup> /Km <sup>2</sup> )	INDICE DE SEDIMENTACION	EFICIENCIA DE RETENCION		APORTACION REAL ANUAL DE SEDIMENTOS		INCREMENTO DE VOLUMEN (Hm <sup>3</sup> )	AÑOS PARA EL LLENADO
					%	VALOR PROM. %	(Ton)	(m <sup>3</sup> )		
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12						TOTAL				

E = ESCURRIMIENTO MEDIO ANUAL, EN Hm<sup>3</sup>

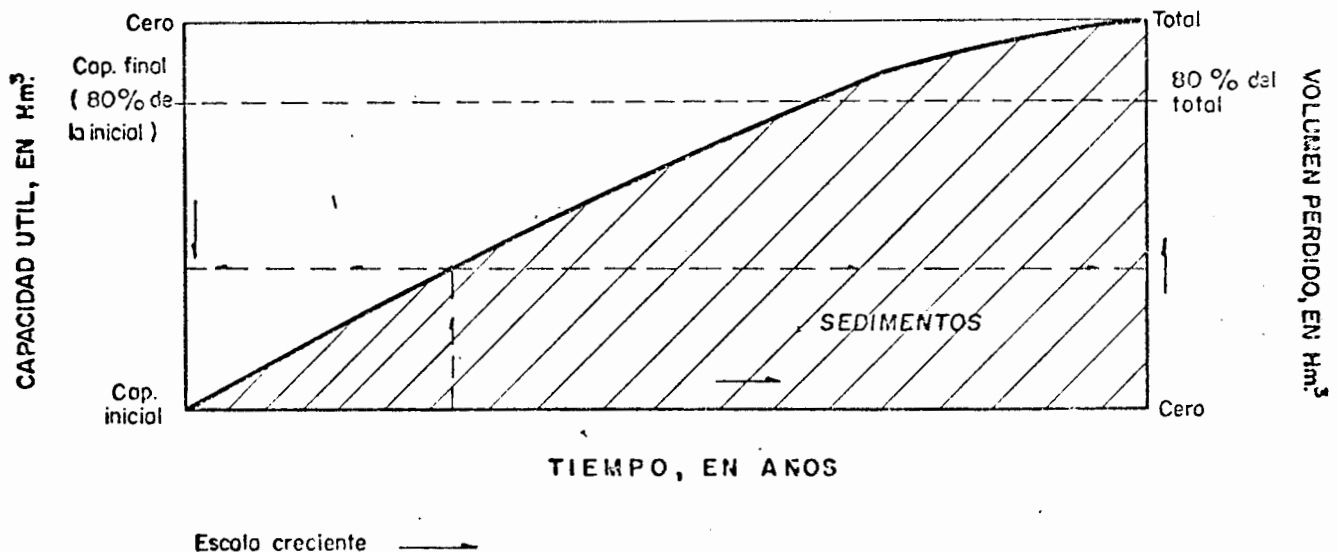
A = AREA DE CUENCA, Km<sup>2</sup>



- COLUMNA 6:** Eficiencia de retención Promedio.  
Para cada incremento de capacidad (col.1) se obtiene su eficiencia de retención promedio.
- COLUMNA 7:** Aportación real anual de sedimentos, en ton.  
Se multiplica la aportación anual de sedimentos (AS) por la eficiencia promedio concluída para cada capacidad.
- COLUMNA 8:** Aportación real anual de sedimentos, en m.  
Si el valor de la aportación de sedimentos se disponía en unidades de peso, se transforma con ayuda de los criterios del capítulo 5 anterior, a volumen en m<sup>3</sup>.
- COLUMNA 9:** Incrementos de volumen, en Hm<sup>3</sup>.  
Los incrementos adoptados (comunmente iguales) en la col.1 para definir las capacidades por estudiar, se enlistan en esta columna.
- COLUMNA 10:** Años para el llemado.  
Se dividen por último, los valores de la col.9 entre los de la col.8 y se obtienen los años necesarios para el llenado de cada incremento de capacidad. Se suman los años obtenidos para encontrar el tiempo de vida probable del embalse.

Se dibujan los valores de la columna 1 y sus respectivos valores acumulados de la columna 10, en una gráfica del tipo:

Fig. 6.6



Con la Fig. 6.6 anterior, se determina el valor del volumen de sedimentos que será acumulado (volumen perdido por el almacenamiento), al término de la vida útil del embalse, adoptada en el inciso 7 del cap. 1. Valor que es indispensable para continuar con el estudio de sedimentos de un vaso.

#### 6.4.2 CRITERIO DE G.I. SHAMOV.

Este criterio presenta un enfoque distinto al anterior, el método consiste en evaluar el volumen final del embalse al término del primer año de operación, por definición del autor igual a la capacidad inicial menos la aportación de sedimentos anual (en volumen).

El cálculo de los volúmenes acumulados en el vaso en los años siguientes, toman-

do en cuenta la atenuación de la sedimentación se puede llevar a cabo por medio de la ecuación de G.I. Shamov (36,6), esta es:

$$V_t = V_{ext} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{V_1}{V_{ext}} \right)^t \right] \quad (6.6)$$

en donde:

$V_t$  = volumen de sedimentos acumulado en el vaso al cabo de  $t$  años, en  $m^3$ .

$V_1$  = volumen de sedimentos acumulados en el primer año, igual a la capacidad inicial del embalse menos la aportación de sedimentos anual, en  $m^3$ .

$V_{ext}$  = volumen extremo de sedimentos que puede guardar el embalse, en  $m^3$ , e igual a (36,6):

$$V_{ext} = C \left[ 1 - \left( \frac{a_r}{a_p} \right)^{1.70} \right] \quad (6.7)$$

en donde:

$C$  = capacidad inicial del embalse, en  $m^3$ .

$a_r$  = sección transversal del río cuando el flujo es cercano al máximo, en  $m^2$ .

$a_p$  = área transversal máxima del embalse en la cercanía de la cortina, en  $m^2$ .

NOTA: Un año debe de ser aceptado como intervalo de estudio.

#### 6.4.3 CRITERIO DE R.J. GARDE Y P.K. SWAMEE.

Otro tipo de enfoque diferente a los anteriores, lo constituye el criterio de - Garde y Swamee disponible en la ref. f. Este criterio aunque interesante presenta como desventaja la incierta evaluación de uno de sus parámetros.

#### 6.4.4 CRITERIO DE A. ROOSEBOOM.

Este método ha sido presentado por su autor en 1976, en base a datos de 4 embalses en U.S.A. y 5 de la República de Africa del Sur, en la ref. t, y constituye una alternativa interesante para la predicción del volumen acumulado en los embalses, cuyas capacidades totales iniciales fluctúan entre 3,250 y 4.9 Hm<sup>3</sup>.

### 6.5 SUGERENCIAS PARA LA APLICACION DE LOS CRITERIOS PRESENTADOS.

De los criterios presentados, el debido a Brune y Allen y el de Churchill no toman en cuenta explícitamente ninguna característica de los sedimentos, por lo cual se consideran de menor confiabilidad que los restantes, y dentro de éstos últimos, el de Karashev es quizás el mejor, siempre que se disponga de la distribución granulométrica de los sedimentos que llegarán al embalse, para determinar su velocidad media de caída, parámetro que es utilizado por el método para tomar en cuenta las características de los materiales que llegan al vaso.

En última instancia, siempre será requerido conocer cuando menos la clase textural de los sedimentos, para aplicar en forma más precisa los métodos de Brown, - de Brune y el del Central Water and Power Commission de la India (inciso 3.7 anterior).

En relación a la simulación de la pérdida de capacidad del vaso debida a la sedimentación, este cálculo es sumamente importante para visualizar la disponibilidad de almacenamiento conforme transcurre la vida del embalse; pues teóricamente, la eficiencia de retención del embalse decrecerá continuamente una vez que se inició la operación, sin embargo, no es práctico analizar tal evolución en intervalos menores a 10 años.

Con relación a lo anterior, la variabilidad de la aportación de sedimentos anual es suficiente razón para no emplear períodos más cortos de análisis.

El movimiento del agua, el cual es creado por las pendientes de los valles, no termina y muere, hasta que ha alcanzado el nivel más bajo del valle.

LEONARDO DE VINCI

## CAPITULO 7: PREDICCION DE LA DISTRIBUCION DE LOS SEDIMENTOS EN EL EMBALSE.

### 7.1 GENERALIDADES.

Contrariamente a la creencia general, los sedimentos no siempre se depositan en el embalse en sus partes más bajas (25,22)\*, sino que lo hacen en diferentes partes del vaso. La manera como los sedimentos son eventualmente distribuidos en el embalse, depende de varios interrelacionados factores, tales como: tamaño y textura del sedimento, relaciones escurrimiento-descargas, tamaño y forma del embalse y política de operación del embalse (5,2). El U.S. Soil Conservation Service, en base a estudios realizados en California, U.S.A., asentó que la finalidad del embalse y las características de los sedimentos tienen marcada influencia en las formas de depositación (47,302).

Cuando el sedimento que llega al vaso, contiene una apreciable cantidad de materiales gruesos o finos coagulados, ocurre una depositación máxima en la entrada al embalse, donde la capacidad de transporte de la corriente es disminuida súbitamente, entonces, arenas y materiales más gruesos son sedimentados primeramente y progresivamente los sedimentos finos serán depositados dentro del embalse. Pero si los sedimentos consisten principalmente de materiales finos muy dispersos, la depositación máxima ocurrirá en las partes bajas del vaso.

Es conveniente indicar, que los depósitos del vaso también pueden ser aumentados por aportaciones de las cuencas o áreas tributarias, aguas abajo del inicio del embalse.

Por otra parte, las acumulaciones de sedimentos en los embalses están usualmente ubicadas por debajo del nivel normal de las aguas. Sin embargo, cuando el embalse tiene un almacenamiento extra para control de avenidas y es anticipadamente conocido que el agua será retenida dentro del vaso por períodos prolongados, una par

\* El primer número indica la referencia bibliográfica empleada y el segundo su página consultada.

te de los sedimentos pueden ser depositados dentro de este almacenamiento (87,14). Un criterio ha sido presentado para el estudio de la depositación en embalses para control de crecientes (93,5-10)

## 7.2 INICIO DEL PROCESO GENERAL DE SEDIMENTACION.

Conceptualmente, la depositación empieza en el cauce principal, pues mientras el escurrimiento entra al vaso, en el cauce se inicia la sedimentación hasta que la elevación de su fondo, es igual o excede a la elevación de sus orillas en uno u otro de sus lados, cuando esto sucede, el flujo se mueve lateralmente (93,5-14).

Durante períodos de niveles altos en el vaso, la sedimentación se mueve hacia arriba y durante descensos de nivel o vaciados del embalse, el cauce forma un tajo dentro de los depósitos y subsecuentemente la acumulación de sedimentos avanza hacia aguas abajo hacia el interior del embalse.

Posteriormente, la vegetación cubrirá los depósitos y se favorecerá la sedimentación, hasta un punto tal que los depósitos toman las características de una planicie de inundación (93,5-15). Estos depósitos son los denominados: DELTAS.

Por otra parte, los sedimentos finos (limos y arcillas) serán transportados dentro del vaso y depositados en el fondo de éste, donde las velocidades del flujo son muy bajas, como por ejemplo, junto a la cortina o en las zonas de aguas quietas o tranquilas (ver Fig. 1.1).

## 7.3 FORMAS DE SEDIMENTACION.

### 7.3.1 DELTAS.

D.C. Bondurant (1955) definió dos formas para el delta: Ideográfica y Compleja. La forma ideográfica consiste en la progresiva depositación de los sedimentos gruesos hacia aguas abajo en el inicio del vaso, cuando el flujo ocupa la totalidad de la sección, por ejemplo, en valles estrechos o encañonados (25,23).

En valles amplios la forma de el delta llega a ser compleja, extendiéndose dentro del vaso sólo una parte de los materiales y comportándose éstos de manera por demás complicada.

La principal consecuencia de el delta, es un aumento en las elevaciones del remanso en el cauce, aguas arriba del embalse. Por lo anterior, el delta puede originar un potencial de avenidas que no había sido considerado en el proyecto (85,21).

### 7.3.2 DEPOSITOS DE FONDO.

Los sedimentos finos como el transporte de lavado, serán llevados por la corriente más allá de el delta y depositados en el fondo del vaso. Los depósitos de fondo son acumulaciones de materiales finos que pueden ser encontrados en cualquier parte del embalse, pero preferentemente en zonas de bajas velocidades.

### 7.3.3 CORRIENTES DE DENSIDAD.

Una corriente de densidad puede ser definida como el movimiento más lento que el escurrimiento por gravedad, del flujo de un fluido bajo o sobre otro fluido de menor densidad. En los embalses las corrientes de densidad son causadas por los flujos altamente concentrados de sedimentos que entran al vaso, con un peso específico mayor que el del agua relativamente limpia del almacenamiento. Las corrientes de densidad transportan considerables cantidades de materiales finos al fondo del vaso (48,8).

El uso de las corrientes de densidad para pasar por medio de ellas los sedimentos finos a través del embalse, ha sido sugerido en varias ocasiones como un medio para reducir la depositación (41,9). Desafortunadamente, la completa comprensión de todas las características de las corrientes de densidad todavía no es alcanzada y solo criterios de tipo empírico o muy teóricos sumamente sofisticados han sido propuestos (t,6).

### 7.3.4 EL FENOMENO DE ESTRATIFICACION.

Las diferencias de temperaturas del agua en diversas áreas y profundidades del vaso, pueden ocurrir debido a los cambios en la temperatura ambiental. Las diferencias en la temperatura, originan diferencias en la densidad, lo cual causará el fenómeno de estratificación del embalse, así como un intercambio de aguas entre zonas de diferentes densidades (41,9). Un análisis mucho más amplio del fenómeno podrá ser encontrado en (k,1).

## 7.4 CRITERIOS PARA PREDECIR LA DISTRIBUCION DE LOS SEDIMENTOS EN EL EMBALSE.

### 7.4.1 DISTRIBUCION DE LOS SEDIMENTOS EN EL VASO.

7.4.1.1 OBJETIVO FINAL DE LA PREDICCIÓN. El objetivo o finalidad de la aplicación de determinados criterios para predecir la distribución de los sedimentos en el vaso, es la modificación o corrección de las curvas Elevaciones-Areas y Elevaciones-Volúmenes, para asemejarlas a las condiciones del vaso después de ocurrida la acumulación de los sedimentos, o sea, al término de la vida útil o de cualquier otro número de años específico.

7.4.1.2 METODOS QUE SE PRESENTAN. Dos métodos empíricos de predicción de la probable distribución de los materiales en el vaso, serán expuestos, estos son:

**METODO AREA-INCREMENTO:** este método es estrictamente matemático, fue desarrollado por Eugene A. Cristofano en 1953 y su ecuación básica es la siguiente (6,5):

$$S = A_0 (H - y_0) + V_0 \quad (7.1)$$

siendo:

$S$  = volumen total de sedimento que será depositado y distribuido en el vaso, en  $m^3$  o  $Hm^3$ .

$A_0$  = área en el embalse correspondiente a la elevación del fondo después de la sedimentación (depositación), en  $m^2$  o  $Ha$ .

$H$  = profundidad máxima del embalse, es la diferencia máxima de elevaciones entre el fondo original del vaso y el nivel de aguas normales (capacidad total), en metros.

$y_0$  = profundidad alcanzada por el volumen de sedimentos ( $S$ ) en el vaso, en metros.

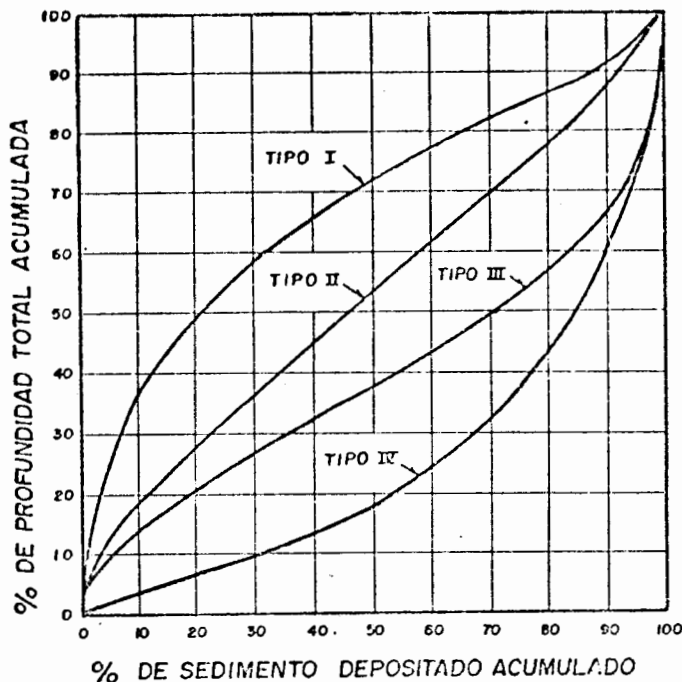
$V_0$  = volumen de sedimentos depositados debajo de la elevación ( $y_0$ ), después de la depositación, en  $m^3$  o  $Hm^3$ .

Una inspección a la ecuación anterior, pone de manifiesto la hipótesis fundamental del método Area-Incremento: la depositación de los sedimentos puede ser simulada por la reducción de las áreas del embalse en cada una de sus elevaciones, en una cantidad fija,  $A_0$  (6,4). En otras palabras, los sedimentos se depositan en el vaso de manera tal que su área permanece constante en toda la profundidad de éste (85,21).

**METODO AREA-REDUCCION:** este método es un procedimiento matemático desarrollado por W.M. Borland y C.R. Miller en 1960, en base a las experiencias obtenidas en 30 grandes embalses (6,4). Este criterio, al igual que el anterior, permiten ajustar las áreas originales del vaso para reflejar su decrecimiento con la sedimentación. Conviene aclarar que aunque la mayoría de los 30 embalses utilizados tuvieron capacidades mayores a los  $50 Hm^3$ , estas variaron entre 1.36 y  $38,547 Hm^3$  (6,Tabla2).

Los datos indican que existen unas relaciones definitivas entre el porcentaje de la profundidad total del vaso y el porcentaje del volumen total de sedimentos existentes, para cada uno de los cuatro tipos de embalses definidos, basándose en su forma física (5,2). Estas relaciones están representadas en forma de curvas adimensionales, en la Fig. 7.1 de la página siguiente.

Fig. 7.1



Las curvas de áreas de diseño (Fig. 7.7), que posteriormente serán utilizadas en la aplicación del método, fueron deducidas a partir de las curvas adimensionales de Borland y Miller anteriores. Estas últimas han sido repetidamente contrastadas con datos de campo, encontrándose algunas discrepancias, pero en general una buena representación de la forma en que se distribuyen los sedimentos en los embalses. Como ejemplos, se presentan los resultados encontrados para 6 embalses en la India (58,20) y 5 embalses de U.S.A. (estos últimos fueron utilizados en la deducción). Cada uno de estos resultados se concentran en las Figuras 7.2 y 7.3 de la página siguiente.

**7.4.1.3 METODO AREA-INCREMENTO.** Este método se considera aplicable a embalses medianos y pequeños. Los datos requeridos para su aplicación son:

1. Elevación del punto más bajo del embalse, en metros.
2. Elevación del agua en el embalse, para las condiciones normales (a capacidad total), en metros.
3. Volumen de sedimentos que serán depositados en el vaso, durante un cierto número de años, en  $m^3$ .
4. Curvas Elevaciones-Areas y Elevaciones-Volúmenes del vaso original.
5. De los datos 1 y 2, se obtiene el valor de H (profundidad máxima del embalse).

**PROCEDIMIENTO DE APLICACION:**

Paso 1: se supone un valor para  $y_0$ , en metros. En base a las curvas de Elevaciones-Areas-Volúmenes del vaso, se obtienen:

$A_0$ , en  $m^2$  y  $V_0$ , en  $m^3$ ; correspondientes a tal elevación.

Sustituyendo los valores anteriores en la ecuación del método (ec. 7.1), se obtiene un valor para S, el cual debe coincidir con el volumen de

Fig. 7.2

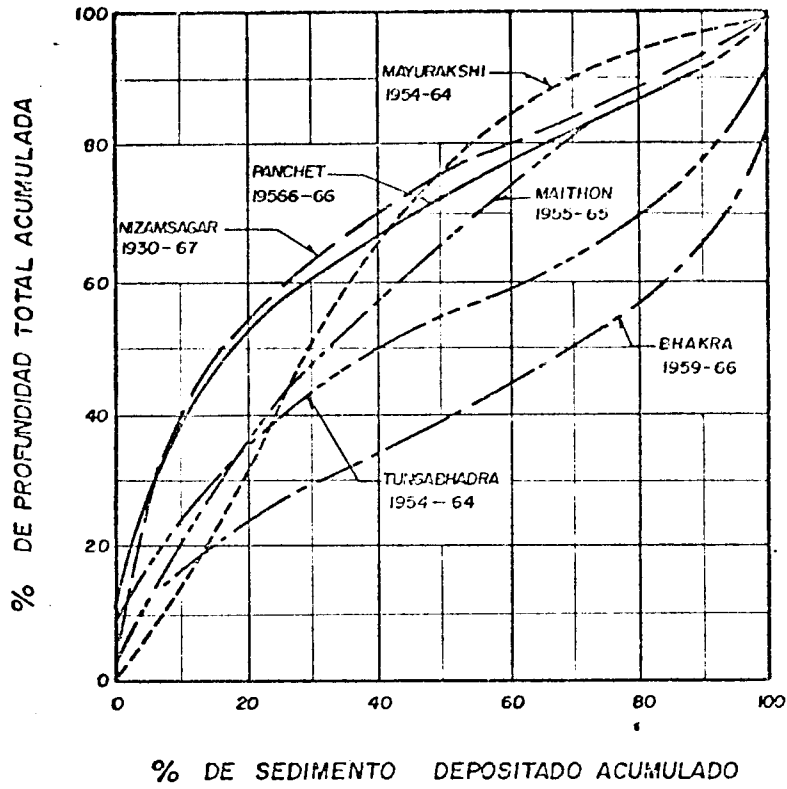
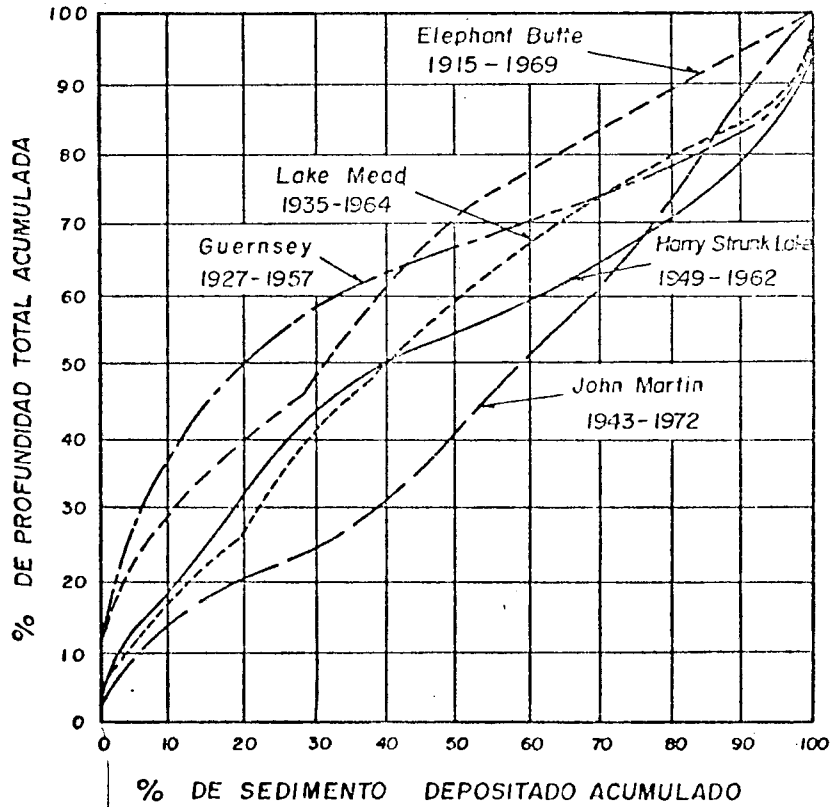


Fig. 7.3



sedimentos que será depositado, de no ser así, se efectúan tanteos para finalmente llegar a las determinaciones siguientes:

$y_0$ : valor que sumado a la elevación del punto más bajo del vaso, permite obtener la llamada: ELEVACION DEL PISO DEL EMBALSE, después o al final de la sedimentación, en metros.

$A_0$ : valor denominado: FACTOR DE CORRECCION DE AREAS, en  $m^2$ .

$V_0$ : volumen bajo la elevación del piso del embalse, en  $m^3$ .



Paso 2: se completa la FORMA DE CALCULO No. 1 (página siguiente), como sigue:

COLUMNA 1: Elevaciones por analizar, en metros. Se deberán de seleccionar arbitrariamente, alrededor de 10, abarcando todo el vaso.

COLUMNA 2: Profundidades (h) en el embalse, en metros. Diferencia entre cada una de las elevaciones de la columna 1 y la cota mínima del vaso original (antes de la sedimentación).

COLUMNA 3: Areas originales del embalse correspondientes a las distintas elevaciones seleccionadas, en  $m^2$ . Se obtienen de la curva Elevaciones----Areas del vaso original.

COLUMNA 4: Volúmenes o capacidades iniciales del embalse para las diferentes elevaciones adoptadas, en  $m^3$ . Se obtienen de la curva Elevaciones-Volúmenes del vaso original.

COLUMNA 5: Valores para corregir las áreas originales del embalse. Para todas las elevaciones SUPERIORES a la llamada anteriormente : Elevación del Piso del Embalse, la reducción es el factor de corrección de áreas  $A_0$  (determinado en el Paso 1) y para las cotas inferiores, su corrección es su correspondiente valor de la columna 3.

COLUMNA 6: Valores a corregir en los volúmenes originales del embalse. Para todas las elevaciones superiores a la denominada: Elevación del Piso del Embalse, la corrección (V) se evalúa con la ecuación 7.1 modificada, ésta es:

$$V = A_0 (h - y_0) + V_0 \quad (7.1')$$

en donde:

$A_0$  = factor de corrección de áreas, en  $m^2$ .

h = profundidad en el embalse (columna 2), en metros.

$y_0$  = profundidad alcanzada por los sedimentos en el vaso, en metros.

$V_0$  = volumen bajo el piso del embalse, en  $m^3$ .

Para las cotas inferiores a la elevación del piso del embalse, su corrección es su respectivo volumen de la columna 4.

COLUMNA 7: Nuevas áreas del embalse. Se calculan por la diferencia entre los valores de la columna 3 menos los de la columna 5.

COLUMNA 8: Nuevas capacidades o volúmenes del embalse. Resultan de la resta a los valores de la columna 4 los de la columna 6.

Paso 3: Los valores obtenidos en las columnas 7 y 8, se dibujan en las curvas Elevaciones-Areas y Elevaciones-Volúmenes, respectivamente.

De esta manera se podrá apreciar objetivamente, la variación que ha sufrido el vaso (pérdida de capacidad, en sus distintas elevaciones, como consecuencia de la sedimentación).

7.4.1.4 METODO AREA-REDUCCION. En general, el procedimiento de aplicación de este método consiste de dos grandes cálculos (6,8), éstos son:



# CALCULO DE LA DISTRIBUCION DE LOS SEDIMENTOS

( Método Area - Incremento )

PROYECTO : \_\_\_\_\_ MPIO : \_\_\_\_\_ EDO : \_\_\_\_\_ FECHA : \_\_\_\_\_

PERIODO DE DISEÑO : \_\_\_\_\_ años VOLUMEN DE SEDIMENTOS (S) : \_\_\_\_\_ m<sup>3</sup>

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
PUNTO	ELEVACIONES	PROFUNDIDADES	AREA DEL VASO	CAPACIDAD DEL VASO	A <sub>o</sub>	V	VALORES CORREGIDOS		
No.	(m)	(m)	(10 m <sup>2</sup> )	(10 m <sup>3</sup> )	(10 m <sup>2</sup> )	(10 m <sup>3</sup> )	AREAS	CAPACIDADES	
							Ac (10 m <sup>2</sup> )	Cc (10 m <sup>3</sup> )	
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									

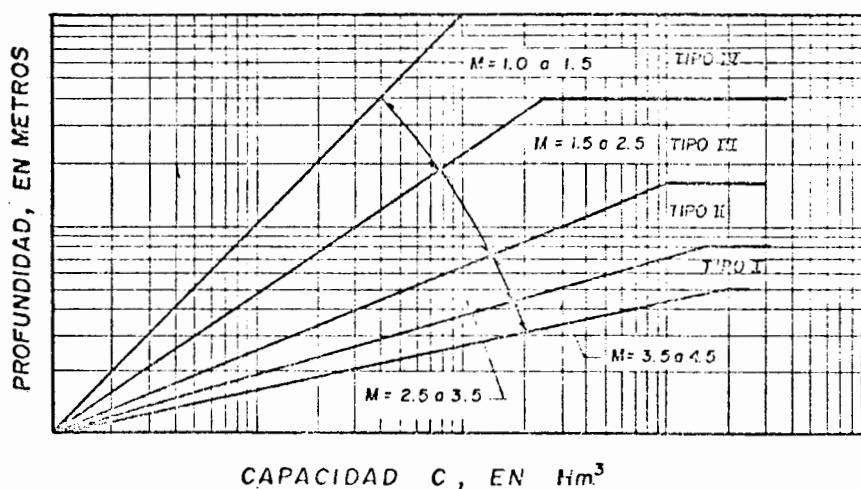
- 1o. CLASIFICACION DE LA FORMA DEL EMBALSE, dentro de alguno de los cuatro tipos que serán definidos.
- 2o. CALCULO POR TANTEOS DEL METODO, hasta que el volumen depositado en el vaso siguiendo el criterio, sea igual al valor previsto de acumulación de sedimentos (S).

La forma del embalse es definida por medio de una gráfica logarítmica, en cuyo eje de las ordenadas se llevan las profundidades del vaso, contra sus respectivas capacidades en las abscisas. Generalmente los puntos dibujados definen una línea recta, cuyo valor recíproco  $M$  de su pendiente, indica el tipo de embalse, según la Tabla 7.1 (85,15) o la Fig. 7.5 (6,8) siguientes.

TABLA 7.1

Tipo de Embalse.	Nombre Descriptivo para el Embalse.	Valor de $M$
I	de Lago.	3.5 a 4.5
II	Planicie de inundación- Pie de montaña.	2.5 a 3.5
III	de Colina.	1.5 a 2.5
IV	de Cañada.	1.0 a 1.5

Fig. 7.5



Ocasionalmente, el tipo de operación del embalse o el tamaño de los sedimentos pueden cambiar o modificar la clasificación del embalse. Por ejemplo, si un vaso que se ha clasificado como tipo III, recibe sedimentos predominantemente arcillosos, o si el embalse tiene severos descensos de nivel frecuentemente, debe ser clasificado como tipo IV porque la mayor parte de los sedimentos serán depositados cerca de su fondo, como en los embalses de cañada.

Por lo general, el tipo de embalse se determina de acuerdo al valor del parámetro  $M$  y a la operación prevista para el vaso, E.L. Pemberton ejemplifica lo anterior para cinco embalses de U.S.A. en la Tabla 7.2 (67,17) de la página siguiente.

Este análisis debe ser utilizado sobre todo cuando el valor  $M$  quedó comprendido en alguna frontera entre dos tipos de embalses.

TABLA 7.2

Embalse:	Tipo a partir de mediciones.	Tipo según valor "M"	Tipo según la operación:		Tipo de embalse seleccionado.
			características	Tipo	
Elephant Butte.	I	I	moderados descensos.	II	II
Guernsey.	II	II	bajos descensos.	I	II *
Harry Strunk Lake.	II	II	moderados descensos.	II	II
John Martin.	III	III	normalmente seco.	III	III
Lake Mead.	II	III	bajos descensos.	I	II

\* El tipo II fue seleccionado porque las características de la operación fueron próximas a las denominadas: moderados descensos.

DATOS REQUERIDOS: Los datos requeridos para el desarrollo del método empírico Area-Reducción, son los mismos citados para el método Area-Incremento en el inciso 7.4.1.2 anterior.

#### PROCEDIMIENTO DE APLICACION:

Paso 1: Clasificación del embalse de acuerdo a los cuatro tipos descritos y -- con el procedimiento también citado se define el tipo de vaso. Conviene aclarar, que para algunos embalses su relación profundidad-capacidad al ser dibujada en papel logarítmico, define dos rectas. Esto ocurre cuando existe una diferencia notoria entre las relaciones alturas-capacidades de la zona inferior del vaso con las de su zona superior. Cuando no se concluya considerar al embalse en alguno de los tipos definidos, debido a la presencia de los tramos de rectas, habrá que aceptar a cada zona enclavada en tipos distintos de embalses.

Paso 2: Cálculo de la elevación del piso del embalse (85,18). Primeramente se calculan varias parejas de valores del tirante relativo (p) y de la función  $h'(p)$  del embalse, estos cálculos se llevan a cabo en la FORMA DE CALCULO No. 2, página siguiente.

Las parejas de valores de (p) y  $h'(p)$  se dibujan en la Fig. 7.6 siguiente y se traza por ellas una línea que intercepte la curva tipo correspondiente a la clasificación anterior del embalse (Paso 1). A partir del punto de corte se determina:

$p_0$ , valor del tirante relativo en el punto de intersección ya citado.

Con el valor anterior se calcula la profundidad alcanzada por los sedimentos en el vaso ( $y_0$ ), al final del período considerado, igual a:

$$y_0 = p_0 (H) \quad (7.2)$$

siendo H el desnivel entre el fondo del vaso y la elevación a capacidad total (inciso 7.4.1.1).

Paso 3: Cálculo de la distribución de los sedimentos en el vaso. Este cálculo se realiza efectuando tanteos, hasta hacer que el volumen

# DETERMINACION DIRECTA DE LA ELEVACION DEL SEDIMENTO DEPOSITADO EN EL EMBALSE

(Método Empirico Area - Reducción)

PROYECTO: \_\_\_\_\_ MPIO: \_\_\_\_\_ EDO: \_\_\_\_\_ FECHA: \_\_\_\_\_

PERIODO DE DISEÑO: \_\_\_\_\_ años VOLUMEN DE SEDIMENTOS (S): \_\_\_\_\_ m<sup>3</sup> H: \_\_\_\_\_ m

1	2	3	4	5	6	7	8
ELEV. (m)	PROFUNDIDAD (m)	P	CAPACIDAD C (10 m <sup>3</sup> )	C - S (10 m <sup>3</sup> )	AREA A (10 m <sup>2</sup> )	H · A	h'(p)

### NOTACION :

P = Profundidad relativa del embalse

C = Capacidad del vaso para una elevación

A = Area del vaso para una elevación

h'(p) = Función del embalse, definida como: 
$$h'(p) = \frac{S - C}{H \cdot A}$$

### RESULTADOS :

Po = \_\_\_\_\_

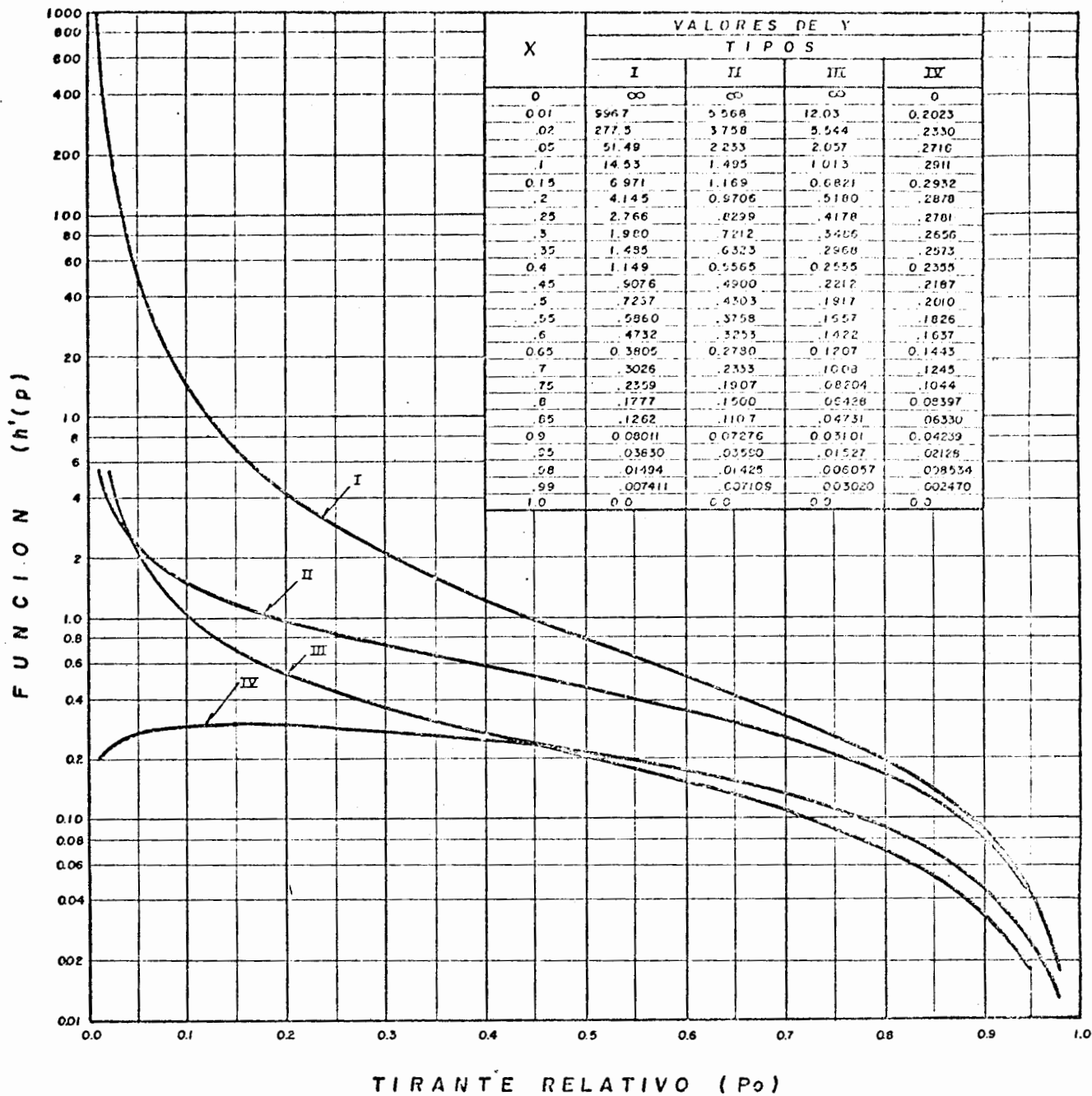
Elevación del fondo = \_\_\_\_\_ m.

Yo = PoH = \_\_\_\_\_ m.

Elevación de los sedimentos depositados en el

embalse = \_\_\_\_\_ m.

Fig. 7.6



de sedimentos distribuido en el vaso según el método Area-Reducción -- sea igual o aproximado al volumen que se prevee se deposite, en el período de años considerado.

Los cálculos se realizan en la FORMA DE CALCULO No. 3 (Página siguiente) diseñada para tal efecto. Las columnas corresponden a:

COLUMNAS 1,2,3 y 4: Valores tomados de las gráficas Elevaciones-Areas y Elevaciones-Volúmenes del vaso original.

En la columna 1 se debe de tener cuidado de tomar alrededor de 10 elevaciones, una de las cuales sea la elevación o cota del llamado: Piso del Embalse ( $y_0$ ), encontrada en el Paso 2.

COLUMNA 5: valores calculados de la profundidad relativa (p), obtenidos dividiendo las cantidades de la columna 2 entre H (profundidad máxima) del vaso.

# FORMA DE CALCULO CALCULO DE LA DISTRIBUCION DE LOS SEDIMENTOS

No. 3

(Método Empírico Area - Reducción)

PROYECTO: \_\_\_\_\_ MPIO: \_\_\_\_\_ EDO: \_\_\_\_\_ CALCULO: \_\_\_\_\_ FECHA: \_\_\_\_\_

PERIODO DE DISEÑO: \_\_\_\_\_ años VOLUMEN DE SEDIMENTOS (S): \_\_\_\_\_ m<sup>3</sup>

PUNTO No.	ELEVACIONES (m)	PROFUNDIDAD (m)	A (10 m <sup>3</sup> )	C (10 m <sup>3</sup> )	P	d Tipo: _____	PRIMER TANTEO		SEGUNDO TANTEO		TERCER TANTEO		VOLUMEN ACUM. DE SEDIMENTOS (10 m <sup>3</sup> )	AREA CORREGIDA Ac (10 m <sup>2</sup> )	VOLUMEN CORREGIDO Vc (10 m <sup>3</sup> )
							AREA DE SEDIMENTOS (10 m <sup>2</sup> )	VOLUMEN DE SEDIMENTOS (10 m <sup>3</sup> )	AREA DE SEDIMENTOS (10 m <sup>2</sup> )	VOLUMEN DE SEDIMENTOS (10 m <sup>3</sup> )	AREA DE SEDIMENTOS (10 m <sup>2</sup> )	VOLUMEN DE SEDIMENTOS (10 m <sup>3</sup> )			
1															
2															
3															
4															
5															
6															
7															
8															
9															
10															
11															
12															
13															
14															
15															
16															
17															
18															
19															
20															
21															
22															
23															
24															
25															
26															
27															
28															
								SUMA		SUMA		SUMA			

1								K <sub>1</sub> =
2								K <sub>2</sub> =
3								K <sub>3</sub> =

COLUMNA 6: A partir de los tirantes relativos (columna 5) de las elevaciones "superiores" al piso del embalse, únicamente, se obtienen los valores del AREA RELATIVA (a), leídos en la Fig. 7.7 (página subsecuente) para la curva correspondiente al tipo de embalse, definido previamente. Las áreas pertenecientes a cotas inferiores al piso del embalse, son iguales a las de la columna 3.

Cuando se requiera una mayor precisión en el valor de "a", o bien, cuando se desee programar el método Area-Reducción, se pueden utilizar las ecuaciones que definen a las curvas adimensionales de áreas relativas de diseño (85,17), estas son:

TABLA 7.3

Tipo de Embalse	C	m	n	Lugar de deposición.	Tipo de Ecuación.
I	5.047	1.85	0.36	superficie.	$a = C p^m (1 - p)^n$
II	2.487	0.57	0.41	mitad superior.	a = área relativa.
III	16.967	-1.15	2.32	mitad inferior.	p = prof. relativa.
IV	1.486	-0.25	1.34	fondo.	C,m,n son constantes

COLUMNA 7: Primeramente se debe de calcular el valor de la constante de proporcionalidad (K), que convierte las áreas relativas del sedimento a áreas actuales para un almacenamiento dado (85,16). Este cálculo se lleva a cabo al final de la FORMA DE CALCULO No. 3, dividiendo el área real del vaso correspondiente a la elevación del piso del embalse entre el área relativa (a) a tal cota.

Para formar la columna 7 se multiplica cada uno de los valores de la columna 6 por la constante K.

COLUMNA 8: Se calculan los volúmenes de sedimento, con la fórmula del prismoide, ésta es:

$$\text{Volumen de Sedimento} = 1/2 (A_1 + A_2) \Delta \quad (7.3)$$

donde:

$A_1, A_2$  = áreas de sedimentos correspondientes a las elevaciones inicial y final de cada incremento entre elevaciones.

$\Delta$  = incremento de elevación, calculada como la diferencia entre los valores respectivos en la columna 2.

Si el volumen total acumulado de sedimentos,  $S_1$  (suma de valores en la columna 8) no coincide o se aproxima al valor dato del volumen de sedimentos que se acumulará en el vaso, se calcula una nueva constante  $K_2$ , definida como:

$$K_2 = K_1 (S / S_1) \quad (7.4)$$

y se repiten las columnas 7 y 8.

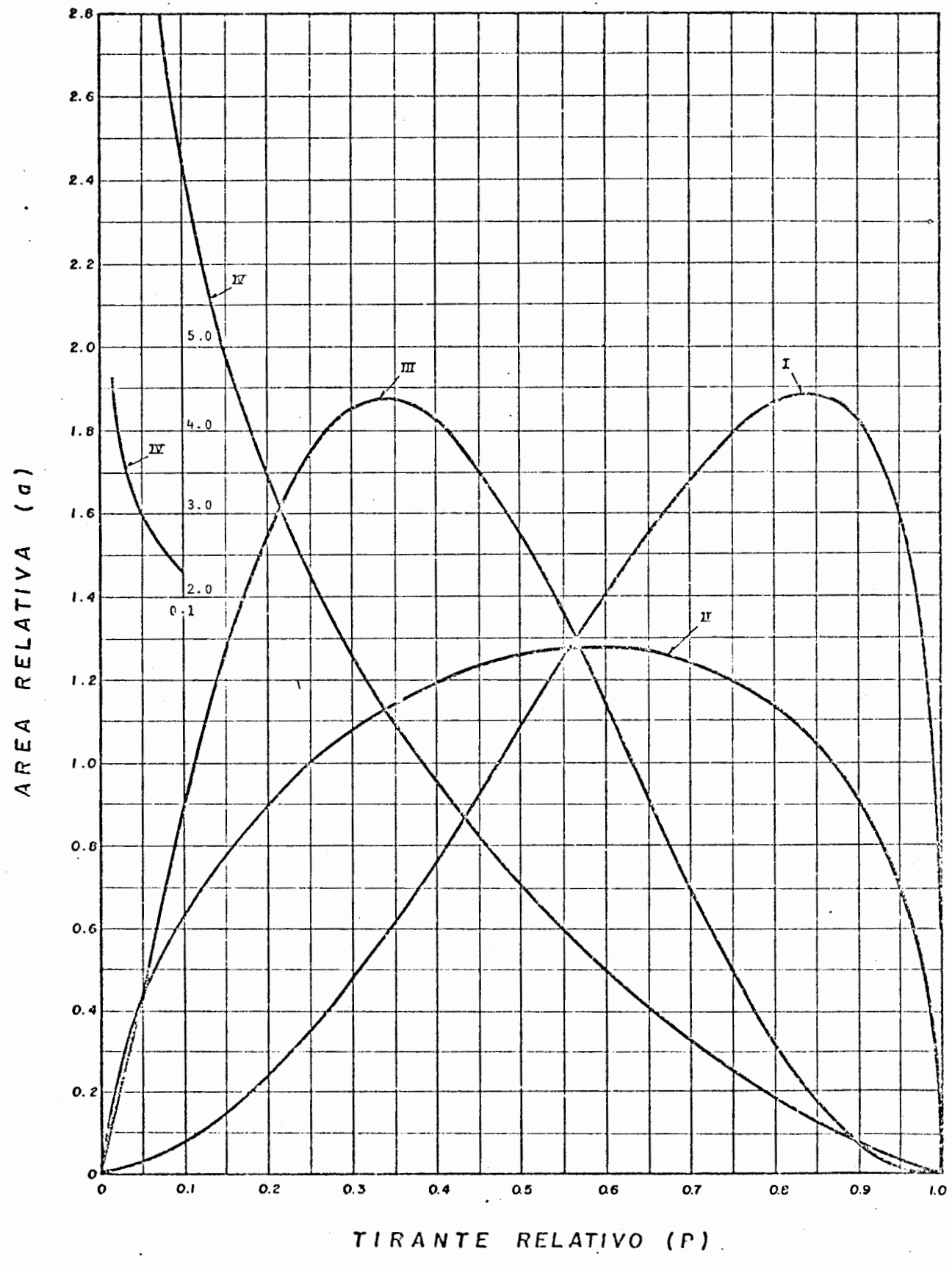
El procedimiento anterior se continúa hasta que los volúmenes  $S_1$  y  $S$  se asemejen satisfactoriamente.

COLUMNA 9: Se evalúan los volúmenes acumulados de sedimentos en el vaso, a partir de las cantidades finales de la columna 8 (determinadas por tanteos).

COLUMNA 10: Las magnitudes de esta columna se determinan por las diferencias entre los valores de la columna 3 menos la columna 7.

COLUMNA 11: Esta columna se completa con los valores obtenidos al restar la columna 9 a la 4.

Fig. 7.7





Paso 4: Corrección a las curvas Elevaciones-Areas y Elevaciones-Volúmenes del embalse.

Las nuevas curvas de áreas y volúmenes del vaso ya ocurrida la sedimentación, son dibujadas a partir de los valores de las columnas 10 y 11, respectivamente, para las elevaciones adoptadas en la columna 1.

#### 7.4.2 VOLUMEN DE EL DELTA DEL EMBALSE.

7.4.2.1 INTRODUCCION. Algunos de los problemas que requieren la estimación en detalle de el delta de un embalse, involucran la construcción de puentes, carreteras y ferrocarriles, la definición de propiedades (urbanas y rurales) afectadas y el diseño de diques protectores alrededor de ciudades (67,12).

La predicción del desarrollo de el delta dentro de un embalse es un problema bastante complejo, debido al tipo de variables que determinan tal desarrollo, como son: tamaño y cantidad de los sedimentos, tipo de destino del embalse y condiciones hidráulicas del tramo inicial del vaso.

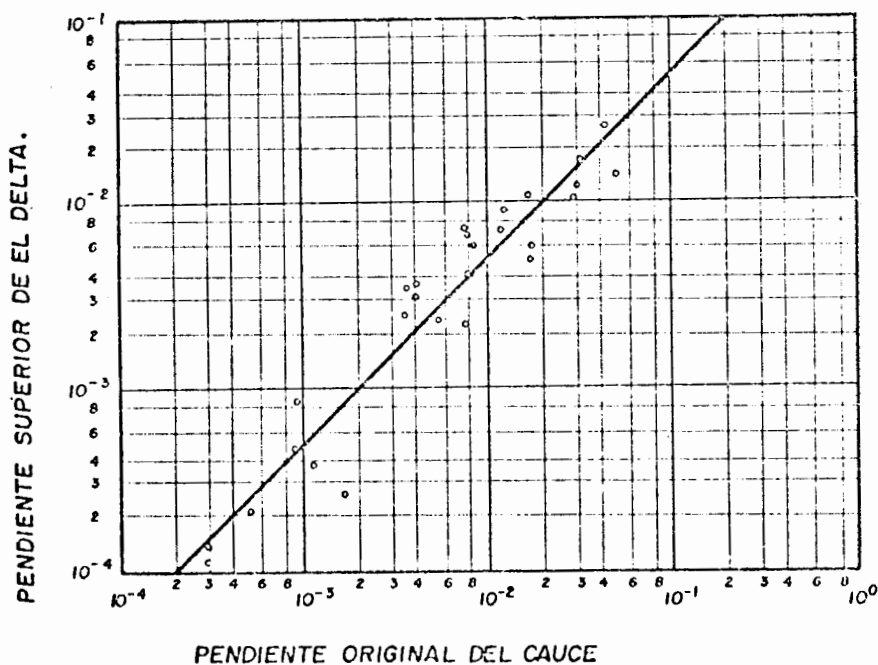
7.4.2.2 PROCEDIMIENTO EMPIRICO DE CALCULO. El método utilizado para predecir la forma de el delta, está basado en un procedimiento empírico que fue desarrollado en base al estudio y medición de las formas adoptadas por el delta en 27 diferentes embalses existentes en U.S.A. (5,4).

En la Fig. 7.8 de la página siguiente, se presenta un croquis general de un delta típico de un almacenamiento.

La pendiente superior de los depósitos en el delta, puede ser calculada por alguno o varios de los siguientes cuatro criterios (67,13):

- Resultados del análisis estadístico de las pendientes superiores de los deltas existentes en 27 embalses de U.S.A.(5,5), que se tienen en la Fig. 7.9 siguiente.

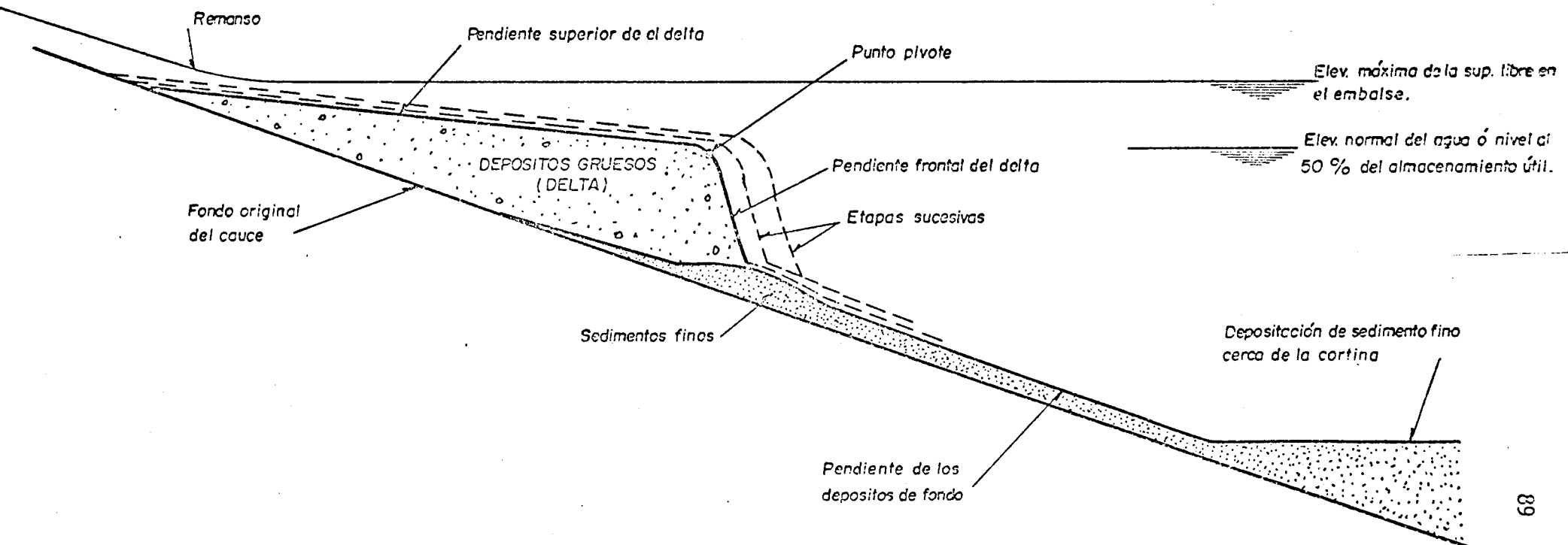
Fig. 7.9



- Aplicación de las fórmulas del transporte de fondo, como las de Schoklitsch y Meyer-Peter y Muller, para la condición de transporte

Fig. 7.8

# PERFIL DE UN DELTA DE EMBALSE TIPICO



nulo y así encontrar la pendiente de los depósitos. Por su sencillez, se presenta la de Schoklitsch (67,13), ésta es:

$$P_d = \left( \frac{0.000021 D B}{Q} \right)^{3/4}$$

siendo:

$P_d$  = pendiente superior de el delta.

$D$  = diámetro medio ( $D_{50}$ ) del material del fondo del cauce, en milímetros.

$B$  = ancho de la superficie libre del agua en el cauce, en metros.

$Q$  = gasto de la avenida media anual, en  $m^3/seg.$

30. Medición de las pendientes de los deltas existentes en uno o varios embalses de tipo similar al estudiado.
40. De acuerdo al 1er. criterio se observa que la pendiente superior -- del delta podría ser estimada como el 50% de la pendiente original de su cauce. (5,5).

La pendiente frontal de el delta es calculada por el producto de una constante por la pendiente superior de los depósitos. Un valor promedio de tal constante es 6.50 de acuerdo a las mediciones en U.S.A.

Un embalse particular puede mostrar considerables variaciones, con respecto a los valores de las pendientes superior y frontal de sus depósitos de el delta, calculados en base a las relaciones empíricas promedio citadas. Para ejemplificar lo anterior, E.L. Pemberton cita los siguientes cuatro embalses de U.S.A. - analizados (67,14), éstos son:

TABLA 7.4

Nombre del Embalse.	Pendiente original del cauce(*)	Pendiente superior de el delta.		Pendiente frontal de el delta.	
		Pendiente	% de (*).	Pendiente	% de (*)
Elephant Butte.	0.00089	0.00055	60	0.0011	2
Guernsey.	0.0012	0.00037	30	0.0024	6.50
Harry Strunk Lake.	0.0013	0.00027	20	0.0032	12
Lake Mead.	0.0012	0.00038	30	0.0073	19

El límite aguas arriba de el delta (unión de el delta con el río), es una serie de puntos ubicados donde la superficie de las aguas del embalse a su elevación máxima, intercepta el fondo original del cauce. Es un conjunto de puntos ésta unión porque la citada superficie es fluctuante (5,5).

La localización del denominado: punto PIVOTE (Fig. 7.8 anterior) entre la pendiente superior de los depósitos y su pendiente frontal, depende primeramente de la operación del embalse y de las pendientes de los cauces existentes en el área de el delta.

La elevación de la superficie normal de las aguas en el vaso es usada como cota del punto pivote, cuando el embalse es operado en este nivel la mayoría del tiempo. Pero cuando la superficie del agua fluctúa frecuentemente y el cauce entra al vaso por medio de un tajo hondo entre los depósitos, una elevación me

dia de operación del almacenamiento será usada para el punto pivote como cota de éste (85,23), es decir, la elevación correspondiente al 50% del almacenamiento útil.

El último paso en la localización de el delta, es un procedimiento de tanteos, para adecuar el volumen de los depósitos con el aportado por el transporte de fondo por el río, durante el período de diseño adoptado para el proyecto, generalmente 50 años para pequeños embalses y 100 años para los grandes (67,14). El volumen de el delta se calcula con las secciones transversales del cauce y los depósitos considerados, este volumen cubicado debe de ser semejante al volumen de sedimentos gruesos que se prevee lleguen al vaso.

Si un ligero ajuste es requerido para hacer que coincidan los dos volúmenes citados, se puede efectuar un pequeño cambio en la pendiente frontal de el delta. En cambio si un ajuste significativo es requerido en el tamaño de el delta, será conveniente mover el punto pivote hacia adelante o hacia atrás en el embalse, pero conservando su elevación previamente fijada. La pendiente superior de los depósitos es trazada a partir del nuevo punto pivote y el volumen de el delta es nuevamente calculado. El procedimiento descrito continua hasta encontrar una concordancia entre el volumen de los depósitos y el aportado por el río como transporte de fondo durante el lapso adoptado (33,2).

No debe causar alarma el que la intersección de la pendiente superior de el delta y el fondo del cauce original se presente arriba de la elevación máxima de las aguas, pues esta condición ha sido observada frecuentemente en pequeños embalses (85,23).

7.4.2.3 OTROS PROCEDIMIENTOS DE CALCULO. Los modelos físicos y las formulaciones matemáticas son otros tipos de procedimientos que han sido implementados para dar solución al problema de la depositación al inicio del embalse (delta), en las referencias 48 y m, se pueden encontrar este tipo de enfoques.

## 7.5 COMENTARIOS GENERALES A LOS METODOS EXPUESTOS.

### 7.5.1 METODO AREA-INCREMENTO.

Este método es sólo una aproximación de la probable localización de los depósitos del sedimento, pues es conocido que éstos, generalmente no reducen las áreas del vaso en la misma cantidad en cualquier elevación (6,7).

Sin embargo, el método Area-Incremento ha dado buenos resultados en la mayoría de los casos, siempre y cuando el embalse en cuestión sea más o menos de un tipo estándar (6,7).

De manera general, se puede decir que si el volumen de sedimentos que se acumulará en 100 años excede del 15% de la capacidad original, el método Area-Incremento ya no brinda resultados confiables, pero puede ser utilizado por su sencillez de aplicación para obtener una primera idea sobre la probable distribución de los sedimentos.

### 7.5.2 METODO AREA-REDUCCION.

Este método presenta varias ventajas con respecto al criterio anterior, por ejemplo, permite la clasificación del embalse en cuestión dentro de una forma tipo, que inmediatamente de una indicación de la manera en la cual los sedimentos se distribuirán (6,15), además, prácticamente no tiene limitación en su aplicación, pues los datos con los cuales fue deducido cubren un amplio rango de capacidades y otras características (ver tabla 2 de la referencia 6, página 9).

Por otra parte, tanto el método Area-Incremento como el método Area-Reducción, tienen como desventaja común el no considerar ciertos factores que definitivamente influyen en la distribución de los sedimentos en el vaso, como son: las corrientes de densidad, el desarrollo de los deltas y la evolución de la densidad de los depósitos en el tiempo.

Otra desventaja del método Area-Reducción se presenta cuando se emplea este criterio para distribuir un volumen considerable de sedimentos en el embalse, es decir, cuando se efectúa un pronóstico de la configuración final del vaso (más del 50% de la capacidad original ocupada por los sedimentos), entonces, el denominado Piso del Embalse se eleva y el método converge lentamente cuando se trata de igualar los volúmenes de sedimento  $S$  y  $S_1$  (ver inciso 6.3 del capítulo 8).

### 7.5.3 VOLUMEN DE EL DELTA.

El procedimiento empírico que se expuso en el inciso 4.2 anterior, para obtener la forma y dimensiones de el delta, permite definir el volumen de sedimentos que se ha acumulado en las elevaciones superiores al nivel máximo normal de las aguas en el vaso.

Aunque en realidad este cálculo no es importante, pues se ha observado que tal volumen rara vez alcanza un 10% del total que se acumulará en un período de 50 a 100 años (6,15).

El citado cálculo reviste importancia cuando se proyecta cualquier tipo de estructura en tal área y se requiere por lo tanto, conocer los niveles que alcanzarán los sedimentos a fin de tomar las medidas necesarias para que las obras construidas no se vean afectadas. En estos casos la cuantificación exacta del transporte de fondo, por los criterios asequibles a los datos, es sumamente importante para determinar el volumen que deberá de tener el delta.

EXPERIENCIA, es el nombre que le da todo el mundo a sus errores.

OSCAR WILDE

## CAPITULO 8: EJEMPLO DE APLICACION DE LA METODOLOGIA PROPUESTA.

### 8.1 GENERALIDADES.

En este capítulo se aplicarán las técnicas anteriormente descritas, al estudio de la sedimentación de un pequeño embalse denominado "El Peaje o Presa Gonzalo N. Santos", localizado a 18 Km. de la ciudad de San Luis Potosí. Este embalse empezó a operar en septiembre de 1950 y durante una sequía que tuvo su época crítica a mediados de 1976, el vaso quedó completamente seco, aprovechándose tal circunstancia para realizar un levantamiento topográfico de éste. También se sabe, que en esa ocasión se estuvieron extrayendo pequeñas cantidades de los sedimentos depositados, para ser utilizados como material de construcción (arena).

Primeramente se estimarán el peso específico de los sedimentos depositados (capítulo 5) y la eficiencia de retención promedio del embalse (capítulo 6), como apoyo a los cálculos de la aportación de sedimentos de la cuenca.

A continuación se evaluará el volumen de sedimentos acumulados en el embalse en sus 27 años de operación, a partir de las dos gráficas Elevaciones-Volúmenes-Areas disponibles del vaso, posteriormente se cuantificará la aportación de sedimentos de la cuenca, de acuerdo a la metodología que fue propuesta en el capítulo 4 y se confrontarán ambos resultados obtenidos, para concluir sobre la magnitud de tal parámetro.

En seguida se efectuará la simulación de la pérdida de capacidad del vaso debida a la sedimentación, para predecir los años de vida del embalse en estudio (inciso 4 del capítulo 6) y obtener la magnitud del volumen de sedimentos que se acumulará en un cierto período de interés, en este caso 80 años de operación del embalse, desde su inicio.

Por último, se aplicarán las técnicas del capítulo 7 para predecir la distribución de los sedimentos en el embalse, bajo dos condiciones de diseño:

- 1a. Del inicio de la operación a 1976 (27 años), para confrontar las dos

configuraciones del vaso obtenidas, una de ellas a partir de los dos levantamientos topográficos (Fig. 8.3\*) y la otra resultante de la aplicación del llamado Método Area-Incremento.

- 2a. Del inicio de operación al término de un lapso considerable de funcionamiento del embalse (se aceptó considerar 80 años), para disponer -- por medio de la aplicación del Método Area-Reducción, de la configuración final del vaso, cuando más del 50% de su capacidad original esté ocupada por los sedimentos (Fig. 8.9).

## 8.2 INFORMACION DISPONIBLE (Resumen).

A continuación se citan las características generales de la Presa Gonzalo N. Santos (15,010)\*\* y se describe la información disponible.

Coordenadas: Longitud  $101^{\circ} 05' 55''$  W.G.  
 Latitud  $22^{\circ} 05' 30''$  N.  
 Altitud 2,030 m.s.n.m. (según carta de DETENAL).

Corriente aprovechada: Arroyo Azul y Las Cabras.

Area de cuenca:  $A = 81 \text{ Km}^2$ . (Ver Fig. 8.1). Localizada en las cartas de DETENAL: F-14,A-83 (Tepetate,S.L.P.) y F-14,C-13 (San Fco.,S. L.P. y GTO.). Se dispone de las cartas topográficas, geológicas, edafológicas y de uso potencial (13,1).

Capacidad Total Inicial del embalse:  $C = 8.0 \text{ Hm}^3$ .

Cortina, vertedor y obra de toma: La descripción de éstas estructuras se puede obtener en la referencia 15, tercera parte.

A partir de la cartografía anterior se obtuvieron:

Longitud del colector principal:  $L = 19.0 \text{ Km}$ .

Desnivel Máximo de las elevaciones de la cuenca:  $H = 800 \text{ metros}$ .

Altura media de la cuenca ( $\bar{h}$ ), calculada en la curva hipsométrica (Fig. 8.2); como el cociente entre el volumen bajo dicha curva y el área de cuenca; resultó igual a:

$$\bar{h} = 268 \text{ metros.}$$

$$\bar{h} = 2,298 \text{ m.s.n.m.}$$

Area de cuenca cubierta con vegetación:  $Ac = 43.5 \text{ Km}^2$ .

Pendiente de la cuenca, calculada con el criterio de Alvord:  $S = 16.4\%$

Longitud total de las corrientes de la cuenca:  $Lc = 187.6 \text{ Km}$ .

### Información Climatológica:

Estación climatológica cercana: El Peaje (aguas abajo del embalse).

Número de años de registro de lluvia mensual: 12 años (1964-1975).

Precipitación Media Anual:  $P = 530.6 \text{ mm}$ .

Registro de lluvias máximas anuales en 24 hrs.: 14 años (1964-1977).

Valores de las lluvias máximas en 24 hrs. en la cuenca, para los períodos de retorno que se indican, obtenidas en base a una serie de excedentes anuales y su procesamiento estadístico con las funciones de distribución Gumbel simple, Log-Pearson tipo III y Gamma (10,194) y a partir de las cartas de curvas isomáximas (16,1):

\* Todas las figuras que se citan en el texto se encuentran al final del capítulo.

\*\* El primer número corresponde a la referencia bibliográfica utilizada y el segundo a su página consultada.

Período de Retorno Tr, en años.	(P <sub>24hrs</sub> ) Tr, en milímetros.	
	con Análisis Estadístico	Con curvas Isomáximas
2	47.5	47.5
10	85.5	90.0
100	166.4	130.0

Lluvia máxima anual en 24 hrs. registrada: (P<sub>24hrs</sub>)<sub>14 años</sub> = 131.0 mm.

#### Información Hidrométrica:

No se dispone de información hidrométrica sobre las aportaciones o las extracciones al embalse El Peaje, por lo cual se estimaron los volúmenes escurridos a la presa por un método indirecto, habiéndose obtenido que el volumen escurrido medio anual es aproximadamente:  $Q = 8.50 \text{ Hm}^3 = 105.0 \text{ milímetros}$ .

### 8.3 ESTIMACION DEL PESO ESPECIFICO DE LOS SEDIMENTOS DEPOSITADOS Y DE LA EFICIENCIA DE RETENCION DEL EMBALSE.

#### 8.3.1 PESO ESPECIFICO DEL SEDIMENTO ( $W_T$ ).

Desafortunadamente, no se dispone de muestras de los sedimentos depositados, por lo cual no es posible conocer la distribución granulométrica de ellos, sin embargo, tomando en cuenta la información contenida en la carta edafológica de DETENAL (Fig. 8.4) se puede proponer desde un punto de vista cualitativo, que el sedimento acumulado en el vaso está compuesto de un 80% de arena y un 20% de limo, con un contenido moderado de materia orgánica (aproximadamente 2% en peso, ver inciso 2.2 del Anexo I).

La consideración anterior, no es en realidad sumamente arriesgada pues se ha visto que si se conoce la clase textural de los sedimentos depositados, el pronóstico de su peso específico sumergido, queda comprendido dentro de un rango estrecho y por lo tanto, no se llega a cometer grandes errores.

A continuación se aplican los criterios descritos en el capítulo 5.

CRITERIO DEL U.S. SOIL CONSERVATION SERVICE. De acuerdo a la consideración anterior y en base a la TABLA 5.2 se tiene:

$$W_T = 0.20(880) + 0.80(1,360) = 1,264 \text{ Kg/m}^3. \text{ valor mínimo.}$$

$$W_T = 0.20(1,210) + 0.80(1,600) = 1,520 \text{ Kg/m}^3. \text{ valor máximo.}$$

CRITERIO DE LANE Y KOELZER. Considerando embalse moderadamente vacío. (ecuación 5.2).

para T = 27 años.

$$W_T = 1,490(0.80) + (1,185 + 43.2 \log 26)(0.20) = 1,441 \text{ Kg/m}^3.$$

para T = 80 años.

$$W_T = 1,490(0.80) + (1,185 + 43.2 \log 79)(0.20) = 1,445 \text{ Kg/m}^3.$$

CRITERIO DE MILLER. Considerando embalse normalmente vacío. (ecuación 5.3).

Cálculo del peso específico inicial ( $w_1$ ), por el método de Lara y Pemberton (ecuación 5.4).

$$w_1 = 1,552(0.80) + 1,136(0.20) = 1,469 \text{ Kg/m}^3.$$

para T = 27 años.

$$W_T = 1,469 + [0.4343 \cdot 0(0.80) + 28.8(0.20)] \left[ \frac{27}{27-1} (\ln 27) - 1 \right] = 1,475 \text{ Kg/m}^3.$$

para T = 80 años.

$$W_T = 1,469 + 0.4343 (5.76) \left[ \frac{80}{80-1} (\ln 80) - 1 \right] = 1,478 \text{ Kg/m}^3.$$



## CRITERIO DE MEGAHAN.

$W_T \doteq 1,240 \text{ Kg/m}^3$ . (Fig. 5.1, con 2% de materia orgánica en peso).

$W_T \doteq 1,156 \text{ Kg/m}^3$ . (Fig. 5.2, con 80% de partículas mayores de 0.50 milímetros, es decir, arena).

Los valores anteriores no serán tomados en cuenta para las conclusiones.

## RESUMEN:

$W_T = 1,264 \text{ Kg/m}^3$ .	valor mínimo.	} según U.S.S.C.S.
$W_T = 1,520 \text{ Kg/m}^3$ .	valor máximo.	
$W_T = 1,441 \text{ Kg/m}^3$ .	T = 27 años.	} según Lane y Koelzer.
$W_T = 1,445 \text{ Kg/m}^3$ .	T = 80 años.	
$W_T = 1,475 \text{ Kg/m}^3$ .	T = 27 años.	} según Miller.
$W_T = 1,478 \text{ Kg/m}^3$ .	T = 80 años.	

CONCLUSIONES:  $W_T = 1,395 \text{ Kg/m}^3$ . para T = 27 años.  
 $W_T = 1,481 \text{ Kg/m}^3$ . para T = 80 años.

## 8.3.2 EFICIENCIA DE RETENCION (ER) MEDIA DEL EMBALSE.

Datos generales:

$A = 81 \text{ Km}^2$ . Esc. Medio Anual (I) =  $8.5 \text{ Hm}^3$ .

$C = 8.0 \text{ Hm}^3$ . Longitud Media del vaso (l) =  $2.50 \text{ Km}$ .

CRITERIO DE BRUNE Y ALLEN: ER = 30% (Fig. 6.1)

CRITERIO DE BROWN: ER = 95.4% (ecuación 6.3).

CRITERIO DE CHURCHILL; Desarrollo (ver inciso 3.4, capítulo 6):

$C = 8'000,000 \text{ m}^3$ .

$A = C/l = 3,200 \text{ m}^2$

$I = 0.27 \text{ m}^3/\text{seg}$ .

$V = I/A = 8.423 \cdot 10^{-5} \text{ m}/\text{seg}$ .

$PR = C/I = 29.68 \cdot 10^6 \text{ seg}$ .

$IS = PR/V = 3.524 \cdot 10^{11}$  (Indice de Sedimentación).

ER  $\doteq$  100% (Fig. 6.3)

CRITERIO DE BRUNE: ER = 97%

CONCLUSION: ER = 97% Eficiencia Media del embalse.

## 8.4 DETERMINACION DE LA APORTACION DE SEDIMENTOS DE LA CUENCA.

## 8.4.1 CUANTIFICACION DEL VOLUMEN ACUMULADO DE SEDIMENTOS EN EL EMBALSE DURANTE 27 AÑOS DE OPERACION.

En la referencia 15, tercera parte, se encuentra el gráfico Elevaciones-Volúmenes-Areas del vaso original del embalse El Peaje (septiembre de 1950) y a partir del levantamiento topográfico de septiembre de 1976 se construyó a igual escala la nueva gráfica Elevaciones-Volúmenes-Areas, habiéndose concentrado tales resultados en la Fig. 8.3. En tal figura se observa que el volumen perdido por sedimentación del embalse, fue de  $1.40 \text{ Hm}^3$ .

Desafortunadamente al no contar con la topografía original del vaso, no se pudo evaluar el volumen de sedimentos acumulados en las elevaciones superiores al nivel de la cresta vertedora (parte del volumen de el delta).

Entonces, la aportación de sedimentos promedio de la cuenca durante los 27 años de operación del embalse es:

$$AS = \frac{1.40 \text{ Hm}^3}{ER (\text{No. de años}) A} = \frac{1.40 \cdot 10^6 \text{ m}^3}{0.97(27)(81 \text{ Km}^2)} \doteq 660 \text{ m}^3/\text{Km}^2/\text{año}.$$

El valor anterior está influenciado por el efecto de consolidación de los sedimentos, por lo cual la aportación de sedimentos real de la cuenca es teóricamente mayor, sin embargo, en este caso tal consolidación será mínima pues los sedimentos son predominantemente gruesos (arenas) y como se vió en el capítulo 5 en estos materiales la constante de consolidación  $K$  es igual a cero.

#### 8.4.2 REVISION EN BASE A LOS CRITERIOS EMPIRICOS DEL VALOR CALCULADO PARA LA APORTACION DE SEDIMENTOS.

Todos los criterios empíricos presentados en el inciso 3 del capítulo 4, que fueron aplicables al proyecto en estudio (de acuerdo a los datos disponibles), sirvieron para revisar el orden de magnitud de la aportación de sedimentos de tal cuenca.

En los criterios donde los resultados de ellos se obtienen en unidades de peso, se convirtieron éstos a volumen utilizando el peso específico de los sedimentos depositados ya calculado, e igual a  $1.395 \text{ Ton/m}^3$ .

#### RESUMEN DE RESULTADOS:

1.  $AS = 762 \text{ m}^3/\text{Km}^2/\text{año}$ . con la TABLA 4.2
2.  $AS = 956 \text{ m}^3/\text{Km}^2/\text{año}$ . como valor promedio obtenido en la TABLA 4.3
3.  $AS = 990 \text{ Ton/Km}^2/\text{año}$ .  
 $AS = 710 \text{ m}^3/\text{Km}^2/\text{año}$ . a partir de la Fig. 4.1, como valor promedio en los 12 años de registro de lluvias mensuales disponible.
4.  $AS = 890 \text{ Ton/Km}^2/\text{año}$ .  
 $AS = 638 \text{ m}^3/\text{Km}^2/\text{año}$ . en base a la Fig. 4.2, como valor promedio de 10 años (eliminando 1971 y 1975 por reportar valores absurdos).
5.  $AS = 510 \text{ m}^3/\text{Km}^2/\text{año}$ . con la Fig. 4.5
6.  $AS = 490,971 \text{ m}^3/\text{año}$ .  
 $AS = 225 \text{ m}^3/\text{Km}^2/\text{año}$ . con la fórmula de Gottschalk (ecuación 4.3)
7.  $AS = 526 \text{ m}^3/\text{Km}^2/\text{año}$ . con la fórmula de Namba (ecuación 4.4)
8.  $AS = 876 \text{ m}^3/\text{Km}^2/\text{año}$ . con la fórmula de Owen y Branson (ecuación 4.5)
9.  $AS = 377 \text{ m}^3/\text{Km}^2/\text{año}$ . con la fórmula de Murano (ecuación 4.6).
10.  $AS = 569 \text{ Ton/Km}^2/\text{año}$ .  
 $AS = 408 \text{ m}^3/\text{Km}^2/\text{año}$ . con la fórmula de Dendy y Bolton (ecuación 4.9)
11.  $AS = 1,540 \text{ Ton/Km}^2/\text{año}$ .  
 $AS = 1,104 \text{ m}^3/\text{Km}^2/\text{año}$ . con la fórmula de Federic Fournier, para los datos siguientes:  $Co = 886.7 \gg 6$ , relieve acentuado.  
Clima: Arido (ecuación 4.19)

**CONCLUSION:** A partir de los 11 resultados anteriores, se puede concluir primeramente que el valor calculado para la aportación de sedimentos de la cuenca, en base a la cubicación de los sedimentos depositados en el embalse, se considera bastante aceptable y dentro del rango que acoitan los resultados de los criterios empíricos.

Por otra parte, el valor promedio de los resultados obtenidos con los métodos empíricos es:

$$AS = 645 \text{ m}^3/\text{Km}^2/\text{año}.$$

#### 8.4.3 APLICACION DE LA FORMULA UNIVERSAL DE PERDIDA DE SUELO A LA CUENCA DEL PROYECTO, PARA EVALUAR LA APORTACION DE SEDIMENTOS.

Las características generales de la cuenca del proyecto, fueron recabadas de la cartografía de DETENAL y concentradas en las Figs. 8.4 y 8.5, en base a tal información se concluyó factible aplicar la Fórmula Universal de Pérdida de Suelo (FUPS) a la cuenca del proyecto, pues aunque ésta excede de 20 Km<sup>2</sup>, puede ser considerada suficientemente homogénea.

EVALUACION DE CADA TERMINO DE LA FUPS (inciso 5 del capítulo 4).

FACTOR R: (ver Anexo II).

Datos generales:

$(P_{24hrs})_{2 \text{ años}} = 47.5 \text{ mm.}$	$(P_{1hr}/P_{24hrs}) = 0.30$	(11,8)
$(P_{24hrs})_{10 \text{ años}} = 90.0 \text{ mm.}$	$(P_{6hrs}/P_{24hrs}) = 0.61$	(11,8)
$(P_{24hrs})_{100 \text{ años}} = 150.0 \text{ mm.}$	$(P_{30min}/P_{1hr}) = 0.79$	(11,8)
$P = 530.6 \text{ mm.}$		

CRITERIO DE W.H. WISCHMEIER Y D.D. SMITH (Fig. II.3, utilizando recta A y extrapolando):  $R = 60.0$

CRITERIO DE D.F. CAMPOS A. (ecuación II.3'):  $R = 55.1$

CRITERIO DE J.A. MAZA A. (ecuación II.4):  $R = 10.7$

CRITERIO DE J.L. SANCHEZ B. (ecuación II.8):  $R = 63.8$

CRITERIO DE W.H. WISCHMEIER Y D.D. SMITH (ecuación II.9):

$$R = 63.2$$

CRITERIO DE W.R. EVANS Y G. KALKANIS (Fig. II.7, utilizando recta I):

$$R = 25.0$$

CONCLUSION:  $R = 60.0$

FACTOR K: Se consideró un sólo tipo de suelo en la cuenca (Fig. 8.4), cuyo factor de erosionabilidad se estimó del orden de 0.20, de acuerdo a la TABLA I.2 y a la Fig. I.2 .

FACTOR LS:

Datos:  $A = 81 \text{ Km}^2.$   
 $L_c = 187.6 \text{ Km.}$   
 $S = 16.4\%$

Cálculo del factor de longitud de pendiente L, según el criterio de Williams y Berndt:

$$L = 215.9 \text{ metros. (ecuación 4.32)}$$

con el criterio de Magallanes:

$$L = 370.7 \text{ metros. (ecuación 4.33')}$$

se adopta un valor para el factor L igual a 250.0 metros. Entonces:

$$L_s = 8.635 \text{ (ecuación 4.34)}$$

FACTOR C: Este factor se calculó en base a los datos de la Fig. 8.5, utilizando la TABLA I.4 para valuar los  $C_i$ , como se ilustra en la tabulación de la página siguiente. Habiéndose concluido un valor de:

$$C = 0.086$$

FACTOR P:  $P = 1.00$  (no existen prácticas contra la erosión en la cuenca).

RESULTADO:  $E = 224.20 (60.0)(0.20)(8.635)(0.086)(1.00) \approx 1,998 \text{ Ton/Km}^2/\text{año.}$

$E \approx 2,000 \text{ Ton/Km}^2/\text{año. (pérdida de suelo estimada).}$

CRITERIOS PARA CLASIFICAR LA VEGETACION.	VEGETACION EN LA CUENCA Y PORCENTAJES QUE CUBREN:			
	Chaparral 15%	Bosque Natural 35%	Pastizal 47%	Matorral Inerme 3%
COBERTURA VEGETAL.				
Tipo y Altura:	C	C	B	B
% de cobertura:	75	50	50	25
COBERTURA DEL TERRENO.				
Tipo:	G	W	W	W
% de cobertura:	80	60	40	40
FACTOR $C_i$ :	0.012	0.082	0.11	0.13

ESTIMACION DEL COEFICIENTE DE ENTREGA DE SEDIMENTOS (CES): Aplicando los criterios presentados en el Anexo III, se obtuvieron los resultados siguientes:

- CES = 28%      2a. gráfica del USDA, Soil Conservation Service (Fig. III.2).  
 CES = 70%      3a. gráfica del USDA, Soil Conservation Service (Fig. III.3).  
 CES = 64.5%    Criterio de S.B. Maner (ecuación III.2).  
 CES = 33.3%    Criterio de S.B. Maner (ecuación III.3).  
 CES = 14%      Gráfica propuesta por el Committee on Sedimentation of the Hydraulics Division, ASCE. (Fig. III.6).  
 CES = 24%      Fórmula deducida en la cuenca de Mule Creek, U.S.A.  
 CES = 12.2%    Fórmula de L.M. Glymph (ecuación III.5).  
 CES = 82.9%    Fórmula de J.R. Williams y H.D. Berndt (ecuación III.6). Para la aplicación de este criterio, se calculó primeramente la pendiente del colector principal por la fórmula de Taylor y Schwarz (ecuación III.7).  
 CES = 14.3%    Tabla de valores de J.N. Roehl (Tabla III.1 y ecuación III.10).

El promedio aritmético de los 9 resultados anteriores es igual a 38.1%.

Eliminando los resultados obtenidos con los criterios 5o., 6o. y 7o. expuestos, por ser considerados de poca confiabilidad, se tiene un valor promedio de los 6 restantes de 45%, que es el valor adoptado para el CES.

Por lo tanto, la aportación de sedimentos a partir de la aplicación de la FUPS será igual a:

$$AS = CES (E) = 0.45 (2,000) = 900 \text{ Ton/Km}^2/\text{año.}$$

es decir:

$$AS = 645.2 \text{ m}^3/\text{Km}^2/\text{año.}$$

#### 8.4.4 VALOR ADOPTADO PARA LA APORTACION DE SEDIMENTOS DE LA CUENCA.

Tratando se ponderar los resultados obtenidos con la cubicación de los sedimentos depositados, los criterios empíricos y la aplicación a la cuenca de la FUPS, se llegó a la conclusión de adoptar el valor de  $700 \text{ m}^3/\text{Km}^2/\text{año}$ . para la aportación de sedimentos promedio de la cuenca del embalse El Peaje, en S.L.P.

#### 8.5 SIMULACION DE LA PERDIDA DE CAPACIDAD DEL VASO DEBIDO A LA SEDIMENTACION.

Los cálculos respectivos se llevaron a cabo en la FORMA DE CALCULO 6.1, siguen

do la metodología indicada en el inciso 4 del capítulo 6 y los resultados obtenidos se han concentrado en la Fig. 8.6 .

De la figura anterior se determinó que el volumen de sedimentos que se acumulará al término de 80 años de operación del embalse, es aproximadamente 4.40 Hm<sup>3</sup>, es decir, más de la mitad de la capacidad original.

## 8.6 PREDICCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS SEDIMENTOS EN EL EMBALSE.

### 8.6.1 INTRODUCCION.

Como se indicó al inicio del capítulo, la predicción de la distribución de los sedimentos en el vaso, se llevará a cabo para dos condiciones de diseño, cada una de las cuales se describe a continuación.

### 8.6.2 APLICACION DEL METODO AREA-INCREMENTO.

Este método se aplicó para un período de diseño de 27 años, con un volumen de sedimentos que serán depositados en el vaso igual a 1.40 Hm<sup>3</sup>, es decir, para las condiciones conocidas en el embalse en 1976.

Siguiendo la secuela dada en el inciso 4.1 del capítulo 7, primeramente se determinaron la elevación del piso del embalse ( $y_0$ ), el factor de corrección de áreas ( $A_0$ ) y el volumen bajo el piso del embalse ( $V_0$ ), el tanteo definitivo fue:

Elevación 2,100.4 m.s.n.m. (propuesta).

$A_0 = 5.20$  Ha.      valores tomados del gráfico Elevaciones-Volúmenes-Areas del vaso original.  
 $V_0 = 0.156$  Hm<sup>3</sup>.

$H = 2,124.25 - 2,090.00 = 34.25$  metros (ver Fig. 8.3).

$y_0 = 2,100.40 - 2,090.00 = 10.40$  metros.

$$S = A_0 (H - y_0) + V_0 \quad (\text{fórmula 7.1})$$

sustituyendo los valores anteriores en la ecuación 7.1, se tiene:

$$S = 5.2 \cdot 10^4 (34.25 - 10.40) + 0.156 \cdot 10^6 = 1'396,200 \text{ m}^3 = 1.40 \text{ Hm}^3.$$

Los cálculos posteriores se siguieron en la FORMA DE CALCULO No. 1 del capítulo 7.

Los valores de las columnas 7 y 8 para sus correspondientes elevaciones en el vaso (columna 1), se llevaron a la Fig. 8.3 observándose una correspondencia -- bastante buena con la configuración del vaso obtenida a partir del levantamiento topográfico de 1976, sobre todo para la curva de volúmenes del embalse.

### 8.6.3 APLICACION DEL METODO AREA-REDUCCION.

Primeramente se procedió a definir la forma del embalse, construyéndose la gráfica logarítmica que relaciona capacidades en el vaso contra sus respectivas -- elevaciones (Fig. 8.7).

Aunque la topografía del vaso define dos rectas, una para tipo IV y otra para tipo III (zona superior), se concluyó clasificar al embalse como tipo IV, pues éste tiene fuertes descensos a lo largo del año y periódicamente, cuando ocurren las sequías, además por sus reducidas dimensiones se prevee que el sedimento se deposite a todo lo largo del vaso y en su fondo, ya que el embalse es físicamente un almacenamiento en cañada.

Siguiendo con la metodología descrita en el inciso 4.1.4 del capítulo 7, se definió la elevación del piso del embalse ( $y_0$ ), utilizando la FORMA DE CALCULO -- No. 2 y la figura 7.6; los resultados obtenidos se tienen en la Fig. 8.8 y al final de la citada forma de cálculo.

Por último, se completó la FORMA DE CALCULO No. 3 (página siguiente) con la secuela descrita en el paso 3 del inciso 4.1.4 del capítulo 7. Los resultados (columnas 10 y 11) se llevaron a una gráfica semejante a la Fig. 8.3 anteriormente citada, para definir la configuración probable del vaso al cabo de 80 años de operación, ésta gráfica es la Fig. 8.9 .

#### 8.7 CONCLUSIONES DEL ESTUDIO SOBRE LA SEDIMENTACION DEL EMBALSE "EL PEAJE".

El estudio sobre la sedimentación ocurrida en la presa El Peaje, permitió poner de manifiesto la importancia de contar con un levantamiento topográfico del vaso, transcurrido un lapso importante de años de su operación. La información que entonces se puede obtener, es decir, la cubicación de los sedimentos y de ahí la cuantificación de la aportación de sedimentos promedio anual de la cuenca, es una valiosa guía para llegar a la estimación de tal parámetro, apoyándose en los otros criterios que hayan sido aplicables.

En el caso concreto del embalse El Peaje, la configuración del vaso después de 27 años de operación, se obtuvo a partir de un levantamiento topográfico realizado cuando éste se secó, sin embargo, en otros casos tal circunstancia no se presentará y es entonces cuando las técnicas batimétricas (inciso 2 del capítulo 3), adquieren una importancia vital.

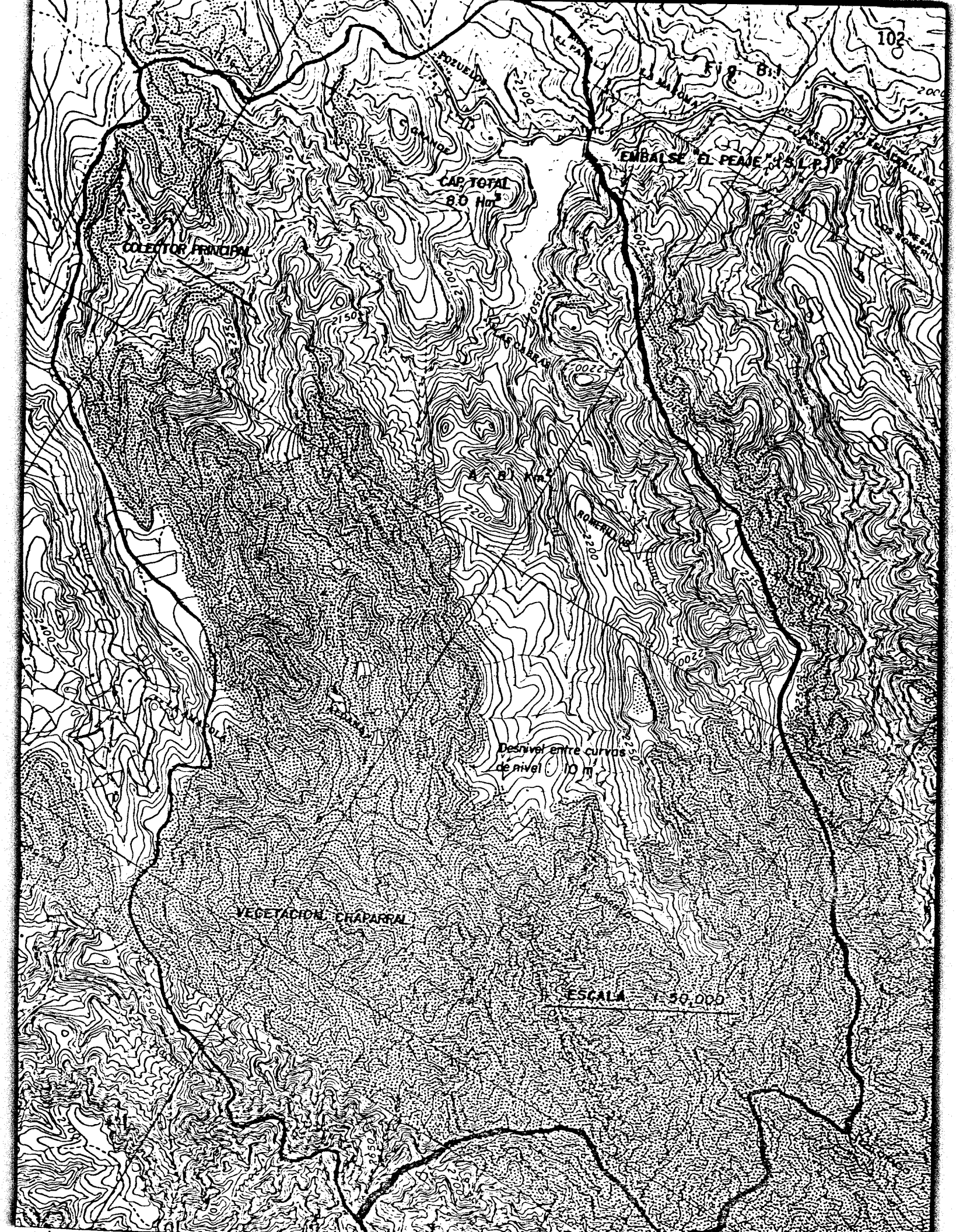
Adicionalmente, se puede concluir que el cálculo más incierto y por tanto el más difícil de todo estudio de sedimentación, es sin lugar a dudas, la estimación de la aportación de sedimentos de una cuenca.

Respecto a los otros cálculos necesarios, como son la determinación del peso específico de los sedimentos depositados, la cuantificación de la eficiencia de retención del vaso, la simulación de pérdida de capacidad del embalse y la predicción de la distribución de los sedimentos en el vaso, son relativamente fáciles de llevar a cabo, pero principalmente, permiten llegar a resultados congruentes con sólo disponer de información elemental.

Como se puede observar en el ejemplo numérico presentado, todos los cálculos están interrelacionados y permiten culminar el estudio de sedimentación, con el pronóstico de la configuración del vaso al cabo de un número determinado de años de operación. A partir de este punto el problema se vuelve eminentemente hidrológico, pues se estudia a continuación la regulación con el embalse, esto es, el número de hectáreas factibles de riego, el gasto posible de extracción para abastecimiento de agua potable o generación de energía hidroeléctrica.

Finalmente se debe elaborar un informe técnico que incluya los datos recabados, los resultados obtenidos (conclusiones numéricas, gráficas, etc.), una memoria de cálculo, las recomendaciones y prácticas de conservación sugeridas para el manejo de la cuenca del proyecto y las especificaciones para las obras de reducción de la aportación de sedimentos requeridas, como por ejemplo: represas para sedimentos y otras obras de corrección de torrentes, etc. (7,1).





102

COLECTOR PRINCIPAL

CAP TOTAL  
8.0 Km<sup>2</sup>

EMBALSE EL PEAJE

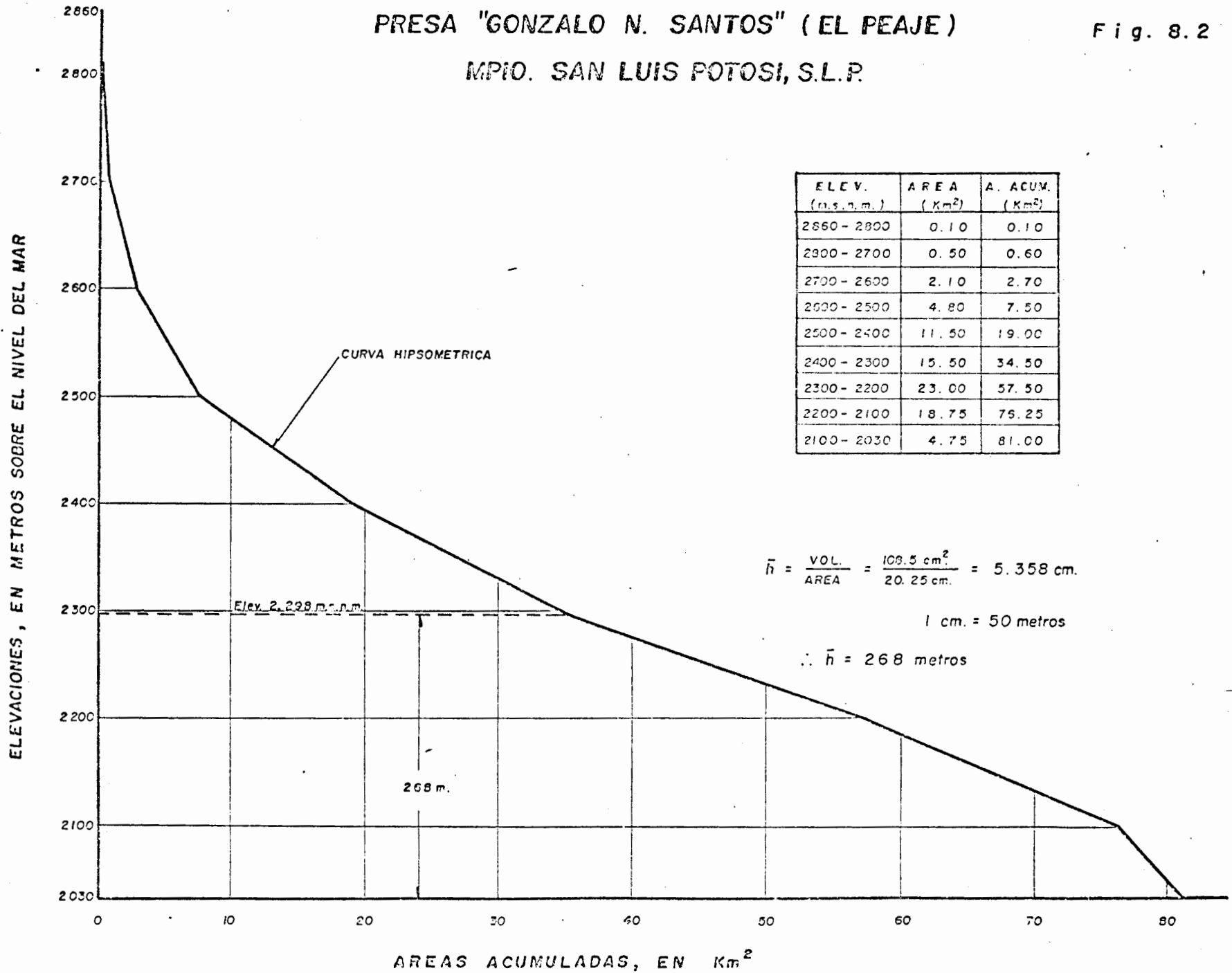
Desnivel entre curvas  
de nivel 10 m

VEGETACION CHAPARRAL

ESCALA 1:50,000

PRESA "GONZALO N. SANTOS" (EL PEAJE)  
 MPIO. SAN LUIS POTOSI, S.L.P.

Fig. 8.2





# GRAFICO ELEVACIONES — VOLUMENES — AREAS

Fig. 8.3

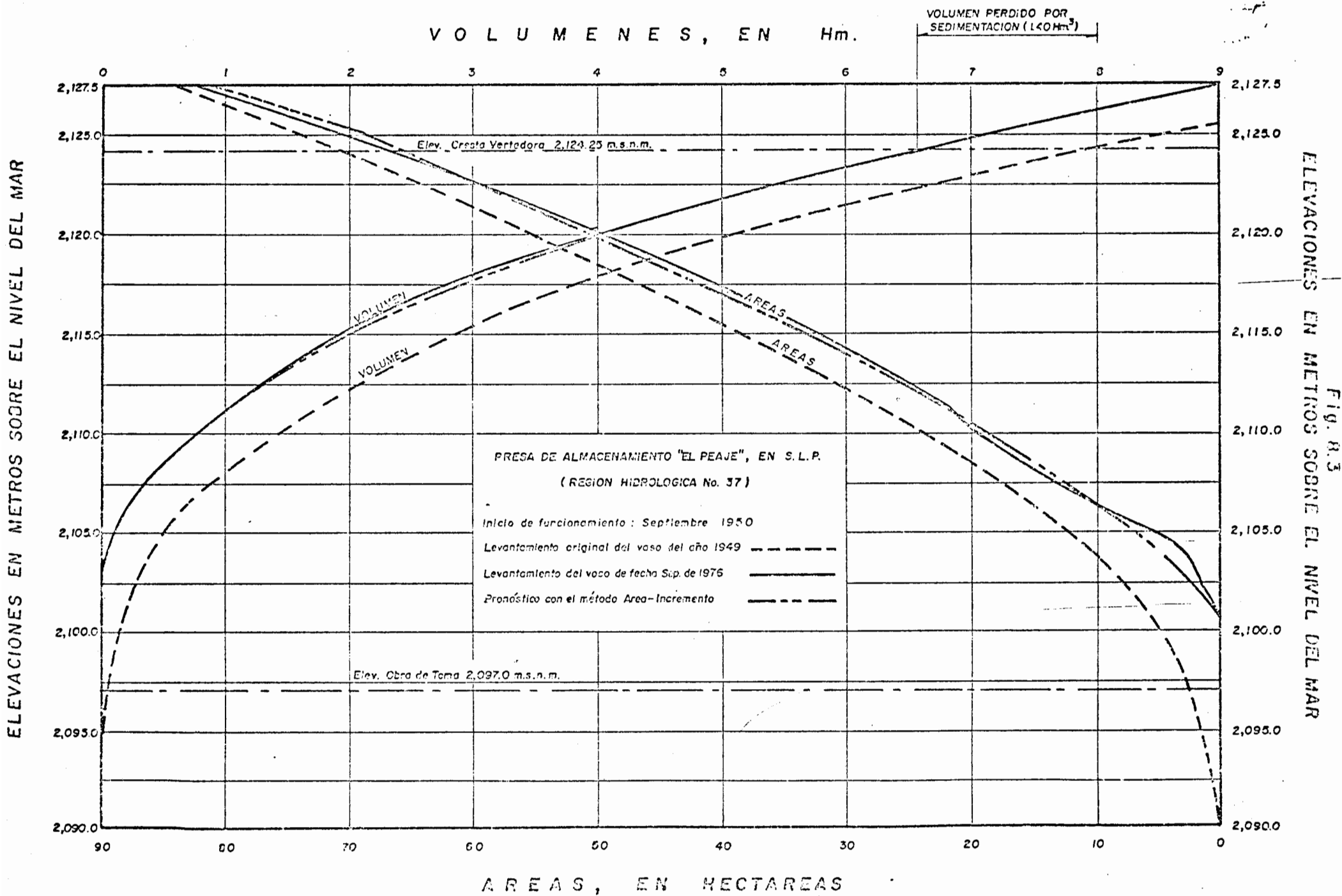


Fig. 8.3

Fig. 8.4

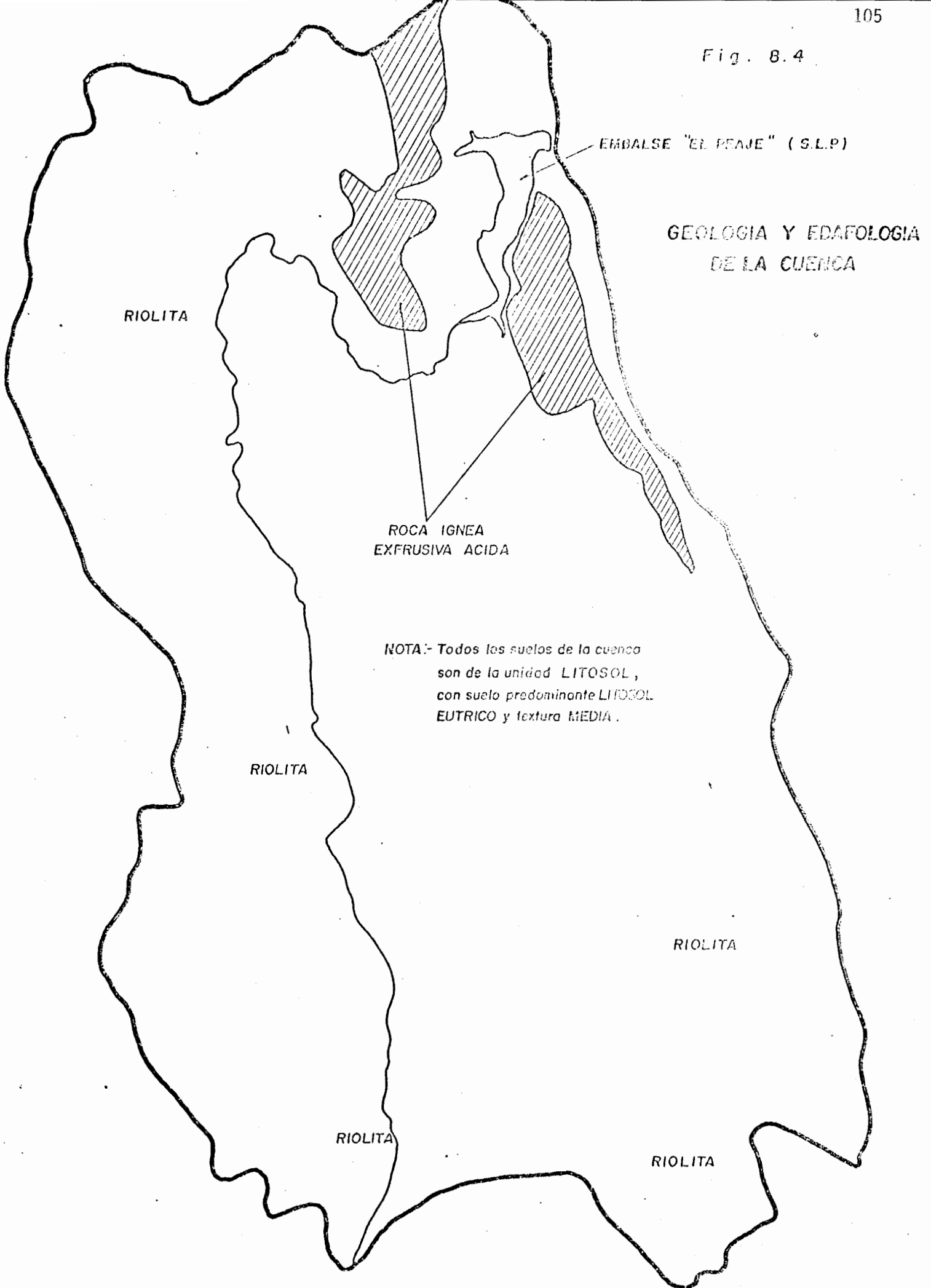
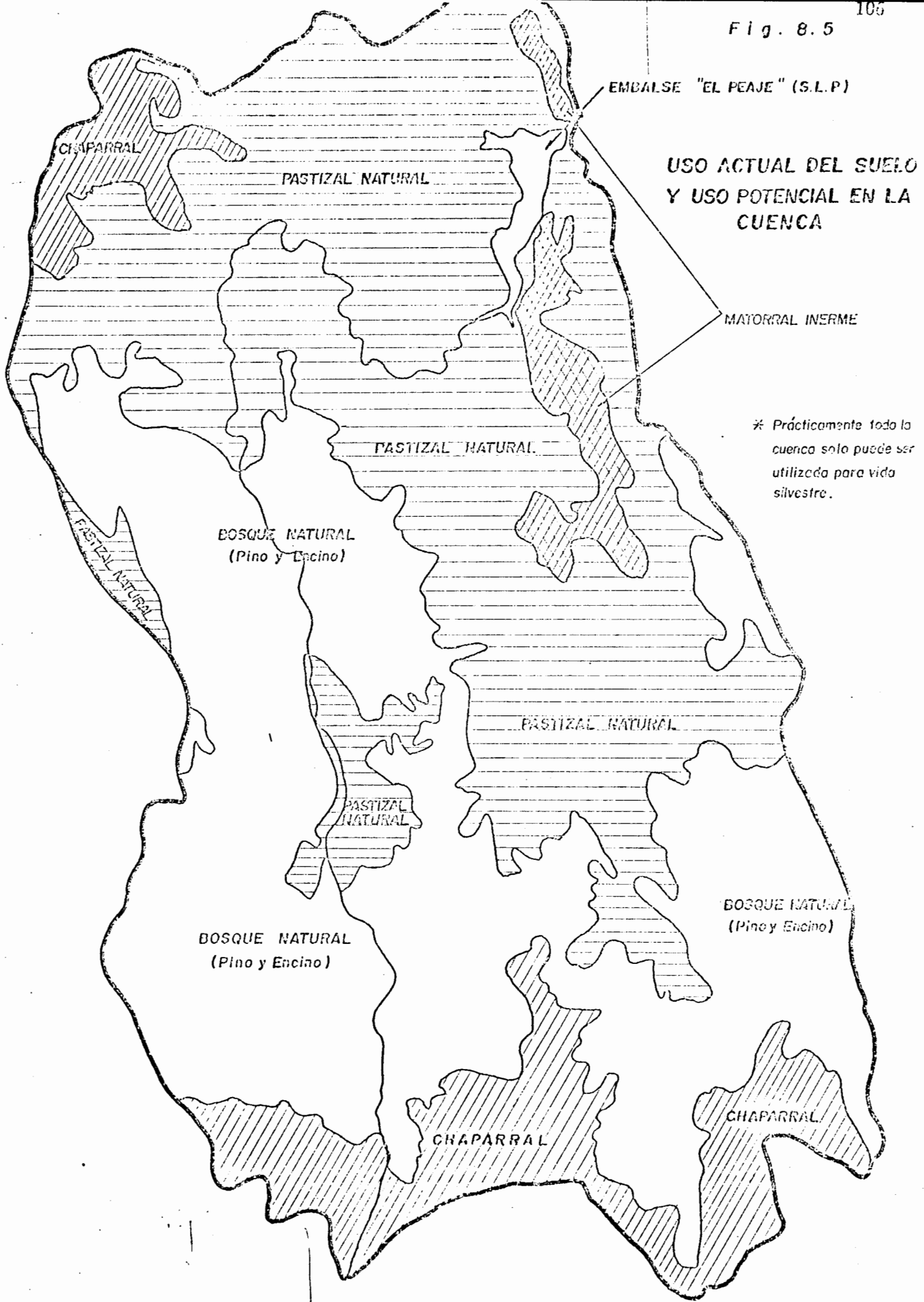


Fig. 8.5



**USO ACTUAL DEL SUELO Y USO POTENCIAL EN LA CUENCA**

\* Prácticamente toda la cuenca solo puede ser utilizada para vida silvestre.

(Forma de Cálculo 6.1)

# SIMULACION DE LA PERDIDA DE CAPACIDAD POR SEDIMENTACION

Proyecto: EL PEAJE Mpio.: SAN LUIS POTOSI Edo.: S. L. P. Cálculo: D. F. C. A.  
 Aportación medio anual de sedimentos: 56,700 m<sup>3</sup> Fecha: JUNIO 1980

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PUNTO No.	CAPACIDAD C (Hm <sup>3</sup> )	RELACION C/E	RELACION C/A (Hm <sup>3</sup> /Km <sup>2</sup> )	INDICE DE SEDIMENTACION	EFICIENCIA DE RETENCION		APORTACION REAL ANUAL DE SEDIMENTOS		INCREMENTO DE VOLUMEN (Hm <sup>3</sup> )	AÑOS PARA EL LLENADO
					%	VALOR PROM. %	(Ton)*	(m <sup>3</sup> )		
1	8.0	0.941	0.099	3.524 x 10 <sup>11</sup>	97.8	97.75	79,096.5	55,424	0.50	9.02
2	7.5	0.882	0.093	3.086 x 10 <sup>11</sup>	97.7	97.65	79,096.5	55,368	0.50	9.03
3	7.0	0.824	0.086	2.689 x 10 <sup>11</sup>	97.6	97.55	79,096.5	55,311	0.50	9.04
4	6.5	0.745	0.080	2.318 x 10 <sup>11</sup>	97.5	97.35	79,096.5	55,198	0.50	9.06
5	6.0	0.706	0.074	1.975 x 10 <sup>11</sup>	97.2	96.90	79,096.5	54,942	1.00	18.20
6	5.0	0.588	0.062	1.372 x 10 <sup>11</sup>	96.6	96.20	79,096.5	54,545	1.00	18.33
7	4.0	0.471	0.049	8.779 x 10 <sup>10</sup>	95.8	95.10	79,096.5	53,922	1.00	18.55
8	3.0	0.353	0.037	4.938 x 10 <sup>10</sup>	94.4	93.30	79,096.5	52,901	1.00	18.90
9	2.0	0.235	0.025	2.195 x 10 <sup>10</sup>	92.2	88.90	79,096.5	50,406	1.00	19.84
10	1.0	0.118	0.012	5.497 x 10 <sup>9</sup>	85.6	81.20	79,096.5	46,040	0.50	10.86
11	0.5	0.059	0.006	1.371 x 10 <sup>9</sup>	76.8					
12						TOTAL				140.83

E = ESCURRIMIENTO MEDIO ANUAL, EN Hm<sup>3</sup>  
 A = AREA DE CUENCA, Km<sup>2</sup>

\* se está considerando un peso volumétrico constante de 1.395 Ton/m<sup>3</sup>.

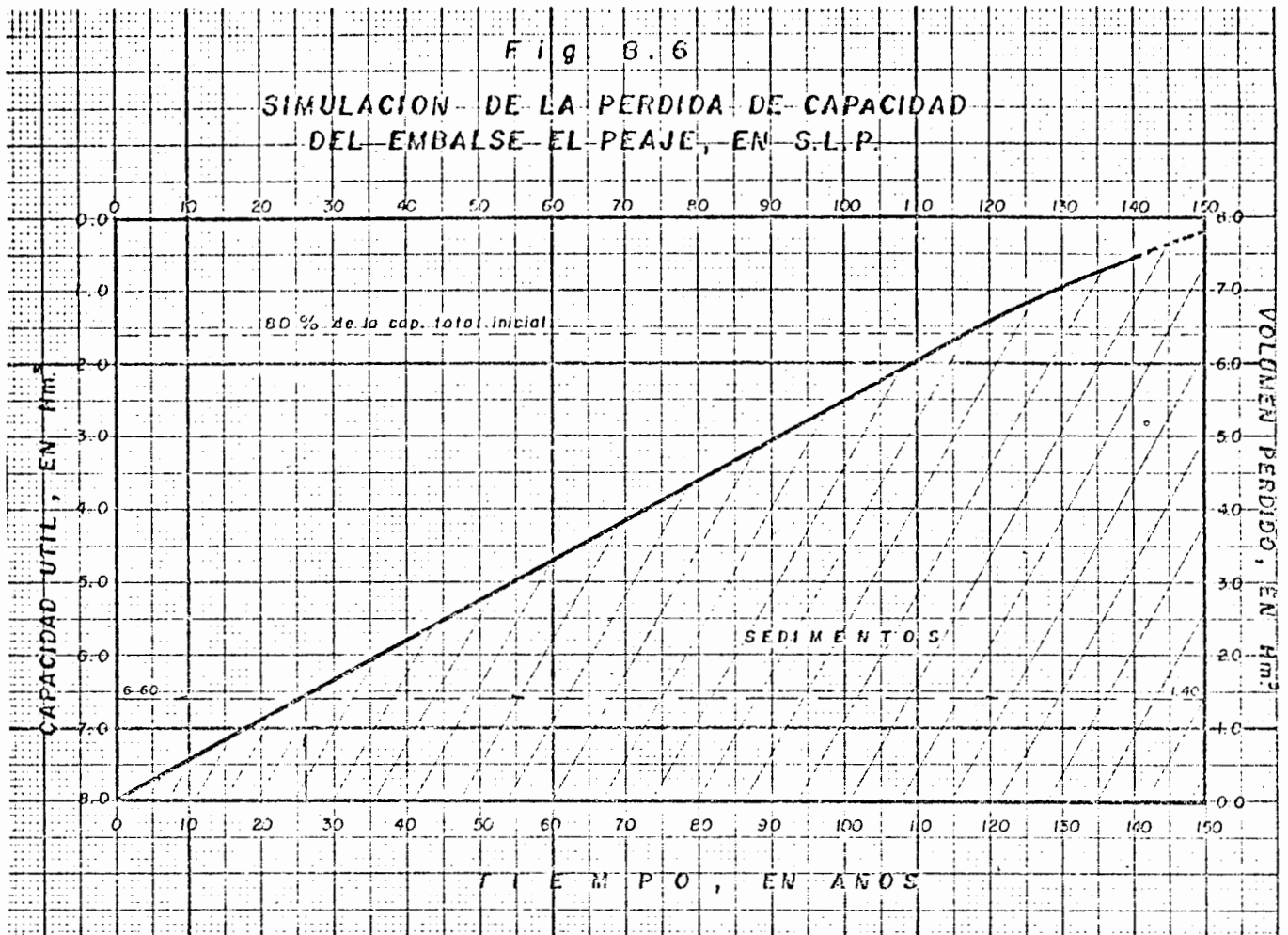
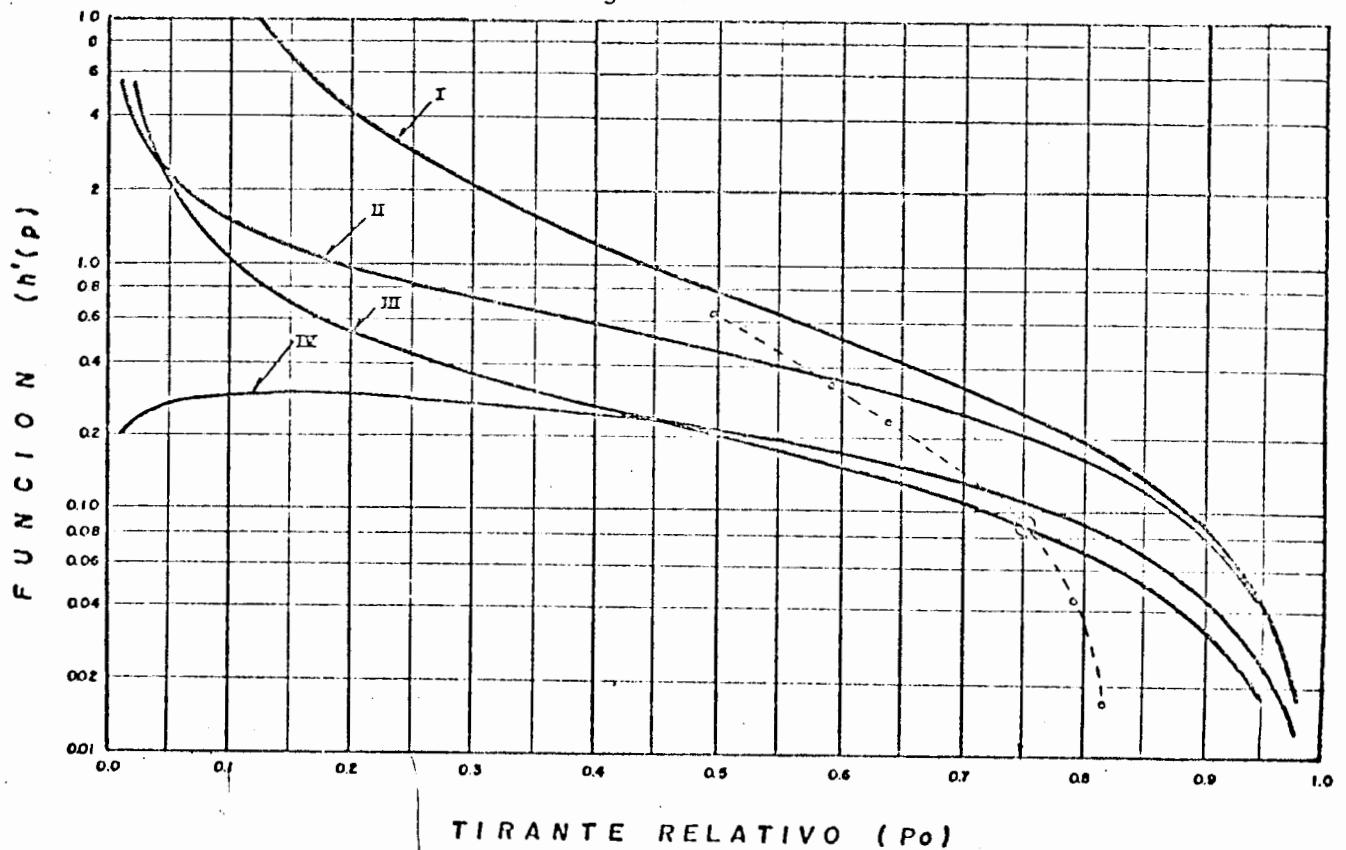


Fig. 8.8



Forma de cálculo No. 1

# CALCULO DE LA DISTRIBUCION DE LOS SEDIMENTOS

( Método Area - Incremento )

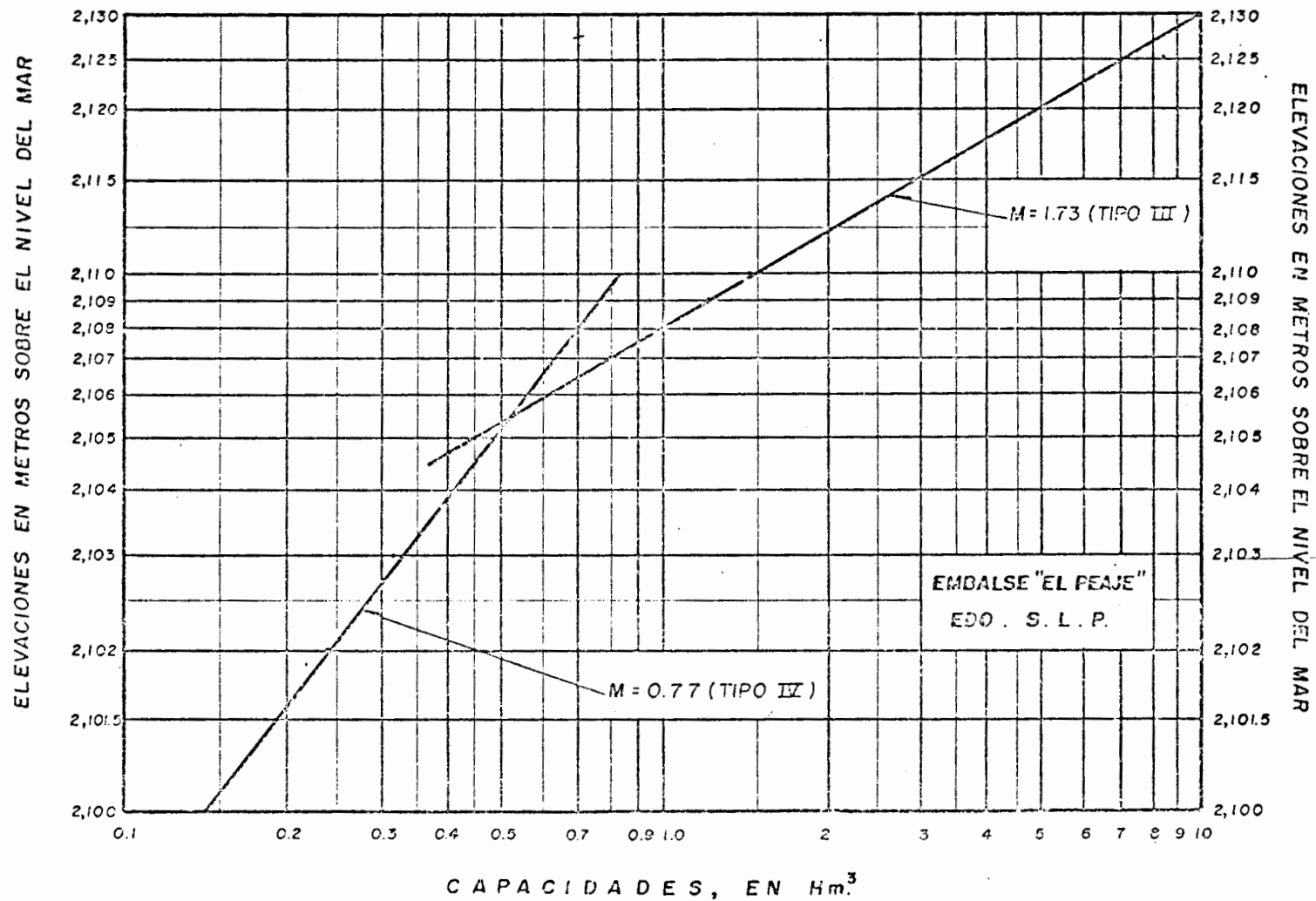
PROYECTO: EL PEAJE MPIO: SAN LUIS POTOSI EDO: S. L. P. FECHA: JUNIO 1980

PERIODO DE DISEÑO: 27 años VOLUMEN DE SEDIMENTOS (S): 1'400,000.0 m<sup>3</sup> CALCULO: D.F.C.A.

PUNTO No.	ELEVACIONES (m)	PROFUNDIDADES h (m)	AREA DEL VASO (10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup> )	CAPACIDAD DEL VASO (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	A <sub>0</sub> (10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup> )	V (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	VALORES CORREGIDOS	
							AREAS A <sub>c</sub> (10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup> )	CAPACIDADES C <sub>c</sub> (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
1	2,090.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.000	0.0	0.000
2	2,095.0	5.0	1.6	0.02	1.6	0.020	0.0	0.000
3	2,100.0	10.0	4.8	0.14	4.8	0.140	0.0	0.000
4	2,100.4*	10.4	5.2	0.156	5.2	0.156	0.0	0.000
5	2,105.0	15.0	12.4	0.50	5.2	0.395	7.2	0.105
6	2,110.0	20.0	24.2	1.46	5.2	0.655	19.0	0.805
7	2,115.0	25.0	38.8	2.84	5.2	0.915	53.6	1.925
8	2,120.0	30.0	55.6	5.12	5.2	1.175	50.4	3.945
9	2,124.25**	34.25	70.4	8.00	5.2	1.396	65.2	6.604
10	2,125.0	35.0	74.2	8.48	5.2	1.435	69.0	7.045
11	2,125.5	35.5	75.6	9.0	5.2	1.461	70.4	7.539
12								
13	* Elevación del Piso del Embalse.							
14								
15	** Elev. cresta vertedora							
16								
17								
18								
19								
20								

Fig. 8.7

GRAFICA PARA EL CALCULO DEL TIPO DE EMBALSE



# DETERMINACION DIRECTA DE LA ELEVACION DEL SEDIMENTO DEPOSITADO EN EL EMBALSE

(Método Empírico Area-Reducción)

PROYECTO: EL PEAJE MPIO: SAN LUIS POTOSI EDO: S. L. P. FECHA: JUNIO 1980

PERIODO DE DISEÑO: 80 años VOLUMEN DE SEDIMENTOS (S): 4'400,000 m. H: 34.25 m.

1	2	3	4	5	6	7	8
ELEV. (m)	PROFUNDIDAD (m)	P	CAPACIDAD C (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	S - C (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	AREA A (10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup> )	H · A (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	h'(p)
2,107	17.0	0.496	0.80	3.60	16.8	5.754	0.626
2,110	20.0	0.584	1.46	2.94	24.2	8.220	0.358
2,112	22.0	0.642	1.96	2.44	29.6	10.138	0.241
2,115	25.0	0.730	2.66	1.54	38.8	13.289	0.116
2,117	27.0	0.788	3.70	0.700	45.6	15.618	0.045
2,118	28.0	0.818	4.12	0.250	48.8	16.714	0.017

### NOTACION :

P = Profundidad relativa del embalse

C = Capacidad del vaso para una elevación

A = Area del vaso para una elevación

h'(p) = Función del embalse, definida como: 
$$h'(p) = \frac{S - C}{H \cdot A}$$

### RESULTADOS :

Po = 0.750

Elevación del fondo = 2,090.0 m.

Yo = PoH = 25.688 m.

Elevación de los sedimentos depositados en el

embalse = 2,115.7 m.



## FORMULA DE CALCULO No 3

# CALCULO DE LA DISTRIBUCION DE LOS SEDIMENTOS

( Método Emprico Area - Reducción )

PROYECTO : EL PEAJE MPIO: SAN LUIS POTOSI EDO: S. L. P. CALCULO: D. F. C. A. FECHA: JUNIO 1980

PERIODO DE DISEÑO: 80 años VOLUMEN DE SEDIMENTOS (S) : 4'403,000.0 m<sup>3</sup>

PUNTO No.	ELEVACIONES (m)	PROFUNDIDAD (m)	A (10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> )	C (10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> )	P	g Tipo: <u>IX</u>	PRIMER TANTEO		SEGUNDO TANTEO		TERCER TANTEO		VOLUMEN ACUM. DE SEDIMENTOS (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	AREA CORREGIDA Ac (10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> )	VOLUMEN CORREGIDO (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
							AREA DE SEDIMENTOS (10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> )	VOLUMEN DE SEDIMENTOS (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	AREA DE SEDIMENTOS (10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> )	VOLUMEN DE SEDIMENTOS (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	AREA DE SEDIMENTOS (10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> )	VOLUMEN DE SEDIMENTOS (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )			
1	2,090.0	0.0	0.0	0.00	0.000	0.000	0.000		0.000			0.000	0.000	0.000	
2								0.040		0.040		0.040			
3	2,095.0	5.0	1.6	0.02	0.146	1.946	1.6		1.6		1.6	0.040	0.000	0.000	
4								0.160		0.160		0.160			
5	2,100.0	10.0	4.8	0.14	0.292	1.273	4.8		4.8		4.8	0.020	0.000	0.000	
6								0.120		0.120		0.120			
7	2,102.0	12.0	7.2	0.24	0.350	1.085	7.2		7.2		7.2	0.320	0.000	0.000	
8								0.294		0.294		0.294			
9	2,105.0	15.0	12.4	0.50	0.438	0.844	12.4		12.4		12.4	0.614	0.000	0.000	
10								0.292		0.292		0.292			
11	2,107.0	17.0	16.8	0.80	0.496	0.707	16.8		16.8		16.8	0.906	0.000	0.000	
12								0.615		0.615		0.615			
13	2,110.0	20.0	24.2	1.46	0.584	0.525	24.2		24.2		24.2	1.521	0.000	0.000	
14								0.690		0.690		0.690			
15	2,112.5	22.5	31.0	2.06	0.637	0.393	31.0		31.0		31.0	2.211	0.000	0.000	
16								1.155		1.155		1.155			
17	2,115.7	25.7	41.2	3.12	0.750	0.249	41.200		41.2		41.2	3.366	0.000	0.000	
18								0.776		0.747		0.726			
19	2,118.0	28.0	48.8	4.12	0.818	0.159	26.308		25.765		21.917	4.092	26883	0.028	
20								0.419		0.378		0.349			
21	2,120.0	30.0	55.8	5.12	0.876	0.094	15.553		14.049		12.957	4.441	42843	0.679	
22								0.252		0.228		0.210			
23	2,122.5	32.5	64.2	6.80	0.949	0.028	4.633		4.185		3.860	4.651	60340	2.149	
24								0.058		0.052		0.048			
25	2,125.0	35.0	74.4	8.48	1.022	0.000	0.000		0.000		0.000	4.699	74.400	3.781	
26															
27															
28															
							SUMA	4.871	SUMA	4.771	SUMA	4.699			

h Elev del sedimento en el embalse

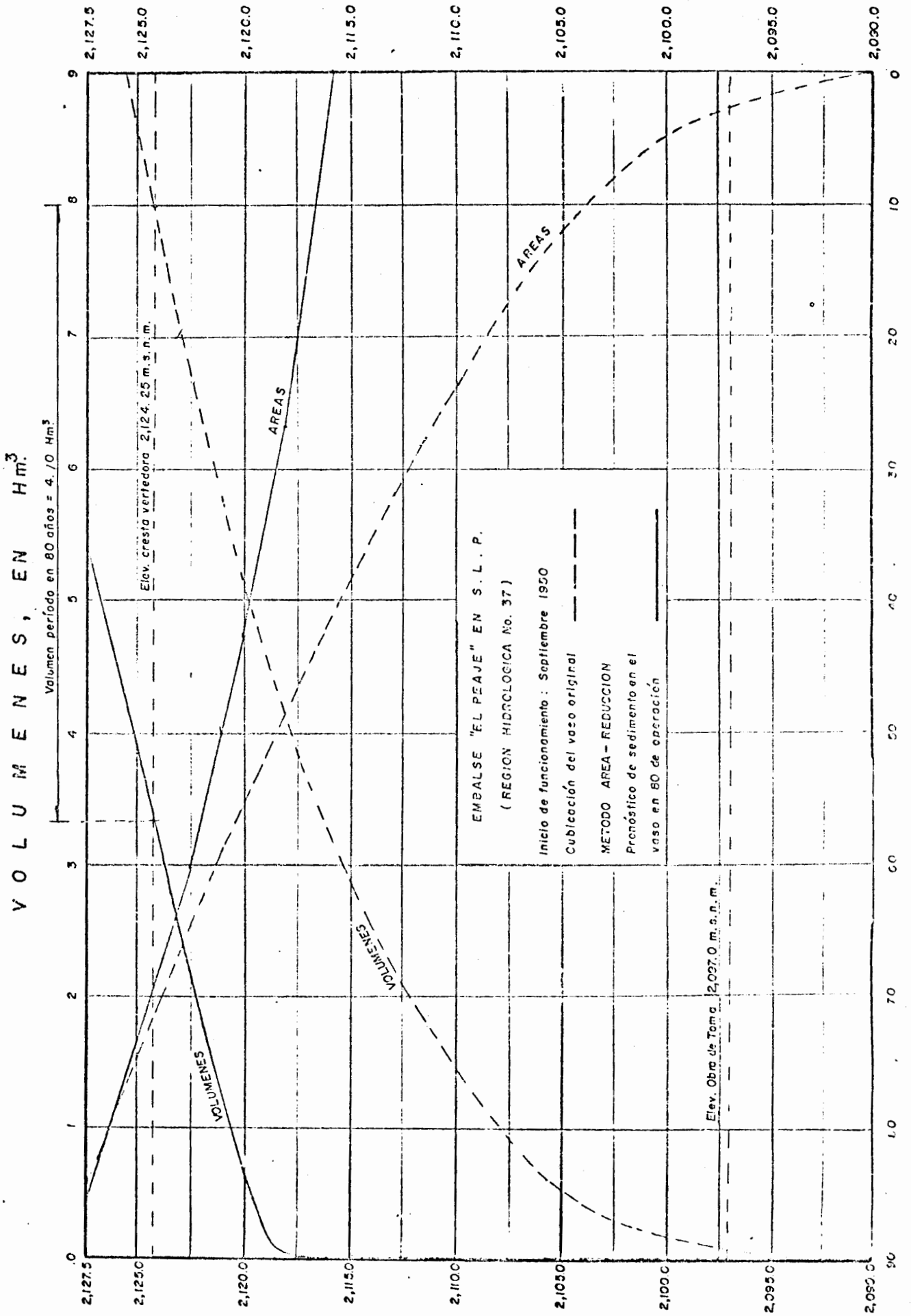
OBSERVACIONES:	$K_1 = 41.2 / 0.249 = 165.462$
	$K_2 = 165.462(4.4 / 4.871) = 149.463$
	$K_3 = 149.463(4.40 / 4.771) = 137.841$

Fig. 8.9

ELEVACIONES EN METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR

GRAFICO ELEVACIONES — VOLUMENES — AREAS

Fig. 8.9



ELEVACIONES EN METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR

La ciencia acrecienta nuestro poder, en la misma proporción en que disminuye nuestro orgullo.

CLAUDE BERNARD

## CAPITULO 9: CONTROL DE LA SEDIMENTACION DE LOS EMBALSES.

### 9.1 INTRODUCCION.

De manera general, se puede decir que la magnitud de la aportación de sedimentos por la cuenca, la eficiencia de retención o atrape del vaso y el peso específico de los materiales depositados, son los factores que determinan el volumen de sedimentos que se depositará durante la operación del embalse, volumen que deberá de ser considerado en el diseño hidrológico, para evitar pérdidas prematuras de un almacenamiento en el vaso destinado previamente a otro propósito específico - (25,29)\*.

Con el objeto de tratar de evitar o reducir la sedimentación de los embalses, se han propuesto y desarrollado muy diversas medidas o técnicas de control de la deposición en los embalses. Lógicamente estas medidas están encaminadas a reducir el efecto de cada uno de los tres factores citados anteriormente, que determinan la magnitud del volumen de sedimentos acumulado en el vaso.

### 9.2 CLASIFICACION DE LAS MEDIDAS DE CONTROL DE LA SEDIMENTACION Y SU APLICABILIDAD.

Todas las medidas prácticas de control o reducción de la sedimentación de los embalses, pueden ser clasificadas en dos grandes conjuntos, éstos son:

PRIMERO: Medidas de Control de la Sedimentacion con el Embalse en Etapa de ESTUDIO, entre tales medidas están las siguientes:

1. Selección del sitio para el embalse.
2. Diseño del embalse.

SEGUNDO: Medidas de Control de la Sedimentación con el Embalse en OPERA-

\* El primer número indica la referencia bibliográfica utilizada y el segundo su página consultada.

CIÓN, entre las cuales se tienen:

3. Control de la depositación en los embalses.
4. Reducción de la cantidad de sedimentos que llegan al vaso.
5. Remoción de los sedimentos depositados.
6. Control de la erosión y reducción de la aportación de sedimentos en la cuenca.

Tanto en los grandes embalses como en los pequeños, cuando están en la fase de estudio, será conveniente analizar las medidas 1 y 2 anteriores. Sin embargo, para los embalses ya construidos la aplicabilidad de las medidas de control de la sedimentación adoptan los dos siguientes patrones.

Los embalses PEQUEÑOS por lo común tienen cuencas rurales, con poca o nada de urbanización y escasas áreas dedicadas al cultivo, debido a esto las soluciones al problema serán de los tipos 5 y 6 anteriormente citadas, específicamente la reforestación y las obras de control del sedimento en los barrancos o cañadas de los de los cauces que afluyen al vaso.

Con respecto a los GRANDES embalses siempre tendrán cuencas de muy variadas condiciones y el propio embalse podrá ser manipulable para evitar la depositación, por tal, las medidas contra su sedimentación incluirán todas las citadas, que sean aplicables a cada caso.

### 9.3 DESCRIPCION GENERAL DE LAS MEDIDAS DE CONTROL DE LA SEDIMENTACION.

#### 9.3.1 SELECCION DEL SITIO PARA EL EMBALSE.

Cuando el proyecto de un embalse permita escoger el sitio para el vaso y la cortina, un estudio cuidadoso debe ser llevado a cabo para predecir la cantidad y propiedades de la aportación de sedimentos que serán producidos por las respectivas cuencas de cada sitio en análisis (46,353). La cantidad y distribución de tamaños de los sedimentos está gobernado por las siguientes características de su cuenca: tipos de suelos, pendientes de los terrenos, pendientes de sus ríos o arroyos, tipos de uso del terreno, coberturas vegetales, formas de erosión en los cauces, etc.

En resumen, la selección del sitio para el embalse deberá de evitar aquellas cuencas o áreas de excesiva producción de sedimentos, cuando sea posible.

#### 9.3.2 DISEÑO DEL EMBALSE.

Para prevenir pérdidas prematuras de almacenamiento y de los servicios que dependen de ello, un adicional volumen en el embalse debe de ser destinado a la acumulación de los sedimentos, este volumen en México se le conoce como CAPACIDAD DE AZOLVES y es de vital importancia en la vida del embalse y en la selección de la elevación del umbral de las obras de toma (4,3).

Considerando a la aportación de sedimentos constante, o sea que no se le puede reducir (lo cual es hipotético), lo que parece inmediatamente lógico es aumentar la capacidad total del embalse, para que de esta manera tenga capacidad o almacenamiento suficiente para los sedimentos, sin afectar el almacenaje del agua regulada.

Desafortunadamente, al aumentar la capacidad del vaso también se aumenta su eficiencia de retención y la magnitud de las pérdidas debidas a la evaporación, aun que se puede decir que este efecto es mucho más acusado en embalses de valle y no en los de montaña.

La determinación de la capacidad máxima del vaso, es un problema netamente económico, sin embargo, se puede afirmar que la vida del embalse tiene que ser como mínimo igual al período de amortización (46,355).

Dentro del diseño del embalse, se debe estudiar la posibilidad de utilizar una serie de obras de toma localizadas a diferentes elevaciones, para que los flujos

o corrientes de densidad sean descargadas antes de que el sedimento en suspensión inicie su depositación. Aún en la actualidad se cuenta con pocos datos cuantitativos sobre tales corrientes de densidad y no obstante, se considera que es probable que más del 20% de la aportación de sedimentos pase a través del embalse por desfogue de tales flujos de agua turbia (46,355).

En algunos casos las tuberías de presión de la casa de máquinas pueden ser usadas para descargar los sedimentos finos acumulados en el embalse, siempre y cuando las turbinas sean protegidas por un by-pass (79,755).

### 9.3.3 CONTROL DE LA DEPOSITACION EN LOS EMBALSES.

La depositación del sedimento en un embalse puede ser controlada en un cierto grado, por el diseño y operación de compuertas y otros desfuegos de la presa, de tal manera que se permita el paso de las aguas que tienen gran concentración de sedimentos.

Con relación a lo anterior, conviene citar las experiencias recabadas en China - en embalses medianos y pequeños, ubicados en cauces con altas aportaciones de sedimentos y concentradas en relativamente corto tiempo (106,2). En tales embalses se formuló una política de operación que consistía en almacenar agua limpia y -- descargar agua turbia para riego principalmente; sus resultados se ilustran en la siguiente tabla para tres embalses medianos (106,5).

T A B L A 9.1

CARACTERISTICAS			EMBALSE <i>Heisonglin</i>	EMBALSE <i>Honglingjin</i>	EMBALSE <i>Zhenziliang</i>
Area de cuenca, en km <sup>2</sup>			3 7 0	1,3 6 4	1,7 4 0
Escurrimiento medio anual, en Hm <sup>3</sup>			1 4. 2	4 3. 2	53. 8
Aportación media anual de sedimentos, 10 <sup>5</sup> ton.			7 0 1	7 7 3	3,4 2 0
Capacidad inicial, en Hm <sup>3</sup>			8. 6	1 6. 6	36. 6
SEDIMENTACION EN LOS EMBALSES, OPERADOS DE DIFERENTES MANERAS	ALMACENANDO A TRAVES DE TODO EL AÑO	PERIODO	May. 1959 a Jul. 1962	May. 1960 a Jul. 1963	May. 1959 a Jul. 1961
		TASA DE SEDIMENTACION Hm <sup>3</sup> /año	0. 5 4 0	0. 5 7 5	4. 2 9 0
		ALMACENANDO AGUA LIMPIA Y EVACUANDO EL AGUA TURBIA	PERIODO	Ago. 1962 a Sep. 1973	Ago. 1964 a Sep. 1973
	TASA DE SEDIMENTACION Hm <sup>3</sup> /año	0. 0 9 3	0. 0 4 5	0. 7 7 5	

### 9.3.4 REDUCCION DE LA CANTIDAD DE SEDIMENTOS QUE LLEGAN AL VASO.

La mayor reducción en la aportación de sedimentos que llegan al vaso, puede ser obtenida con la construcción de grandes presas aguas arriba del embalse en cuestión. Estas presas no solamente atraparán sedimentos sino que también cambiarán el régimen del flujo, decreciendo entonces, la capacidad de transporte del cauce (48,9). Esto último puede llegar a ser cierto en ríos con fondo de cantos rodados y gravas, y puede no ser verdad en cauces arenosos, donde las extracciones o descargas de los embalses provocarán erosión, cuyos productos se irán a depositar en el vaso de aguas abajo.

Son cuatro los principales métodos que han sido utilizados para reducir la aportación de sedimentos a los embalses (8,65), éstos son:

#### 1o. REPRESAS PARA SEDIMENTACION.

Estas obras incluyen muy diversos tipos de pequeñas cortinas construídas en las corrientes que afluyen al embalse, con el objeto de reducir la velocidad y causar la depositación de por lo menos el sedimento grueso (4,13).

Los materiales de construcción de estas represas son también muy variados y dependen principalmente de las condiciones estructurales de trabajo y de los recursos económicos para su construcción, pueden incluir los siguientes materiales: concreto, mampostería, tierra, gaviones, roca, y ramas con otros materiales.

En realación a sus condiciones generales de diseño, se puede indicar que por lo común se deben de diseñar para retener el sedimento generado por la tormenta de 100 años de período de recurrencia y además retener la aportación de sedimentos promedio anual de 2 a 3 años (89,16).

Por otra parte, estas represas deben ser mantenidas en operación por la periódica remoción de los materiales acumulados o atrapados, por medios mecánicos.

En las referencias g, h, y, se pueden encontrar con suficiente detalle los criterios de diseño de este tipo de obras de control de la sedimentación de los embalses.

#### 2o. CUBIERTAS VEGETALES DE PROTECCION.

Frecuentemente el proceso natural de producción de semillas puede acelerar el desarrollo de la más efectiva cubierta vegetal contra la erosión (25,31). En general la cubierta vegetal consiste de una densa asociación de plantas cuyo efecto en el escurrimiento es favorable hacia la infiltración, reducción de su velocidad y protección del suelo.

La protección de las orillas de un cauce por la vegetación es sumamente útil, sin embargo, en los lugares donde el abastecimiento de agua es escaso, esta vegetación constituye un consumo por evapotranspiración (8,65).

#### 3o. CONSTRUCCION DE EMBALSES LATERALES.

Los denominados Embalses Laterales son bastante ventajosos cuando las condiciones topográficas son favorables y no se requiera utilizar la totalidad del escurrimiento de la corriente. El encausamiento del flujo hacia el embalse debe estar controlado por una estructura con compuertas, diseñada de tal manera que los gastos de avenida, los cuales transportan grandes cantidades de sedimentos, sean desviados sin llegar al vaso lateral y de forma tal que permita la alimentación del vaso con agua relativamente limpia o clara, para aminorar su sedimentación (8,65).

#### 4o. CANALES Y CONDUCTOS DE DESVIO.

En U.S.A. los canales y conductos de desvío han sido construídos en combinación con muy pocos embalses de propósitos especiales (8,65). Esta alternativa puede ser utilizada si parte del escurrimiento puede ser por así decirlo, desperdiciado y si las condiciones topográficas permiten un corto desvío.

### 9.3.5 REMOCION DE LOS SEDIMENTOS DEPOSITADOS.

Excepto en el caso de represas para sedimentación, las cuales tienen un valor -- económico suficientemente alto para justificar la evacuación de sus sedimentos, -- la remoción del material depositado en los embalses es raramente, si no es que -- siempre, incosteable (89,17).

La remoción de los sedimentos de un embalse puede ser efectuada por una variedad de métodos hidráulicos y mecánicos, cuya selección depende de la naturaleza del sedimento y de su localización en el vaso. Por ejemplo, el dragado hidráulico es el método más económico para evacuar sedimentos finos sumergidos. Algunas veces tales materiales son bombeados sobre la cortina, sin embargo, el retorno del sedimento en cantidades excesivas al cauce, puede originar aguas abajo problemas -- muy graves.

En cambio, los sedimentos gruesos requieren equipos mecánicos para llevar a cabo su remoción, como por ejemplo: camiones, bulldozers y pala mecánica (25,30). Las operaciones de remoción de sedimentos son extremadamente costosas, a menos -- que el material pudiera ser utilizable y vendible, pero en general, la construcción de un nuevo embalse es más económico que la evacuación del sedimento de -- otro existente (46,356).

### 9.3.6 CONTROL DE LA EROSION Y REDUCCION DE LA APORTACION DE SEDIMENTOS DE LA --- CUENCA.

Este tema será tratado con mucho mayor detalle en el capítulo 10 siguiente.

## 9.4 VALORACION DE LAS MEDIDAS DE CONTROL SELECCIONADAS.

### 9.4.1 INTRODUCCION.

Definitivamente todavía no es físicamente posible construir los embalses de mane -- ra tal que dispongan del almacenamiento suficiente para todos los sedimentos que retenga y que además hidrológicamente cumpla con sus propósitos.

El enfoque actual es la aplicación de una serie de métodos alternativos para el control de la sedimentación, para asegurar el funcionamiento futuro adecuado de dicho embalse y abatir el costo del mismo.

Los métodos de control aplicables son cualquiera de los anteriormente descritos, cada una de estas medidas necesita ser evaluada separadamente para determinar su factibilidad, efectividad y costo de puesta en práctica y de esta forma poder se -- leccionar los métodos más prácticos.

Aún haciendo la selección apropiada sobre las alternativas de control de la sedi -- mentación, estos costos aumentan considerablemente la inversión requerida por la obra, pero desgraciadamente, si no se ejecutan, con el tiempo se perderá TODA la inversión, pues el embalse estará lleno de sedimentos y no de agua regulada, a -- este respecto se transcribe a continuación un párrafo de la referencia 64, pági -- na 3:

"Quizás al calcular como lo hacemos, la rentabilidad de las obras de regu -- lación, estamos incurriendo en un grave error de apreciación. Los recursos hidráulicos son limitados y la humanidad necesita para su supervivencia -- cada día más agua y además agua regulada para usarla según sus necesida -- des. No se necesitan argumentos económicos para defender las obras de regu -- lación de nuestros ríos. Las inversiones que realicemos en estas obras son una preciosa herencia que dejamos a las generaciones futuras que, con seguridad, valorarán con óptica distinta el agua regulada.

¿ Y qué herencia vamos a dejar a nuestros descendientes, si al realizar un plan de aprovechamiento integral de una cuenca, nos olvidamos de tomar -- las medidas necesarias para que los embalses construídos no hayan desapa -- recido dentro de cien años? "



Para combatir una enfermedad se necesita conocerla previamente. El conocimiento y el estudio de la erosión, son las premisas de toda política de conservación de suelos.

FEDERIC FOURNIER

## CAPITULO 10: BREVE DESCRIPCION DE LAS TECNICAS PARA COMBATIR LA EROSION EN LA CUENCA.

### 10.1 INTRODUCCION.

Todas las rocas de la Tierra están expuestas a un doble ataque de los agentes atmosféricos: la disgregación mecánica y la alteración química. Cuando los productos de la acción de éstos dos fenómenos se combinan con la materia orgánica, surge el SUELO, esto es, la capa externa de la corteza terrestre, situada entre la roca no alterada y la atmósfera (22,37)\*.

Sin embargo, al formarse el suelo, éste queda expuesto inevitablemente a la acción erosiva de los mismos agentes que lo formaron. Si el proceso de formación y destrucción o desgaste es normal, es decir, natural, se establece un equilibrio (erosión Normal, ver capítulo 2), pero si existe una ruptura del mismo, en favor comúnmente de las acciones destructivas, el proceso de desgaste se acelera enormemente (erosión Acelerada) y es a tal fenómeno al que se le atribuye la destrucción al menos parcial de una quinta parte de los terrenos de cultivo del mundo (22,38).

Hace un cuarto de siglo, se efectuaron en U.S.A. los primeros reconocimientos acerca de la erosión, encontrándose que grandes extensiones de terreno estaban afectadas por ella. Desde entonces a la fecha, gran parte de los daños se han evitado por medio de muy diversas técnicas, entre las cuales están: la variación en el aprovechamiento de los terrenos, las mejoras en la fertilización de los suelos, la intensificación en el uso de cubiertas vegetales protectoras, la construcción de obras para control de las aguas, etc. (19,6).

En el transcurso de esta toma de conciencia, el concepto de conservación del suelo, en un principio restringido a la lucha contra la erosión, se ha visto ampliado e identificado con el de una "explotación racional del medio ambiente" (22,19),

\* El primer número entre paréntesis corresponde a la referencia bibliográfica utilizada y el segundo se refiere a su página consultada.



y en la actualidad incluye un gran número de medidas y técnicas de conservación.

## 10.2 MANEJO DE CUENCAS.

En relación a lo anterior, se puede indicar que el objetivo actual del manejo, - protección y desarrollo de una cuenca, está basado en las siguientes premisas - (90,2):

- 1a. Uso de cada Ha. de terreno de la cuenca dentro de su capacidad, para evitar la deterioración del recurso suelo.
- 2a. Aplicación de las prácticas mecánicas, culturales y vegetativas adecuadas a cada Ha. de suelo, para evitar su destrucción y obtener el óptimo manejo del suelo, agua y vegetación.
- 3a. Control o únicamente protección frente a los fenómenos productores de sedimentos, como avenidas, deforestaciones, urbanización, etc. para reducir la depositación en embalses y puertos, maximizar los beneficios de las obras de control de avenidas y eludir la pérdida de ca lidad de las aguas.
- 4a. Mejoramiento y manejo de las coberturas vegetales, como bosques y -- pastizales, para obtener madera y forrajes, así como protección donde tal cobertura representa el óptimo uso del terreno.
- 5a. Desarrollo de la combinación más efectiva y económica, entre el control de la vegetación y las medidas estructurales (embalses, canales, desvíos, etc.).

Por otra parte, la elaboración de un proyecto para protección de una cierta área en una cuenca, requiere el desarrollo de los 6 pasos siguientes (90,4):

- 1o. Identificación de los problemas de erosión en la cuenca, en relación a sus condiciones existentes y su potencial de desarrollo.
- 2o. Determinación cuantitativa de los problemas detectados en el paso anterior.
- 3o. Distinción de los factores que originan los problemas detectados y cuantificados.
- 4o. Determinación de las posibles medidas correctivas.
- 5o. Selección y evaluación de las medidas correctivas factibles.
- 6o. Instalación y mantenimiento de las medidas preventivas seleccionadas.

En la referencia recomendada p, se exponen los lineamientos y normas, para la -- elaboración de proyectos de control de la erosión, y además se detalla con precisión los datos requeridos.

## 10.3 CLASIFICACION PROPUESTA DE LAS MEDIDAS DE CONSERVACION DE SUELOS.

La clasificación general propuesta para las medidas o técnicas de conservación - de suelos, se tiene en el Cuadro Sinóptico 10.1 de la página siguiente.

En base a tal división precedente, se describirán a continuación brevemente cada una de las diversas técnicas de conservación, destacando sus particularidades, -- ventajas y aplicabilidad en cada caso.

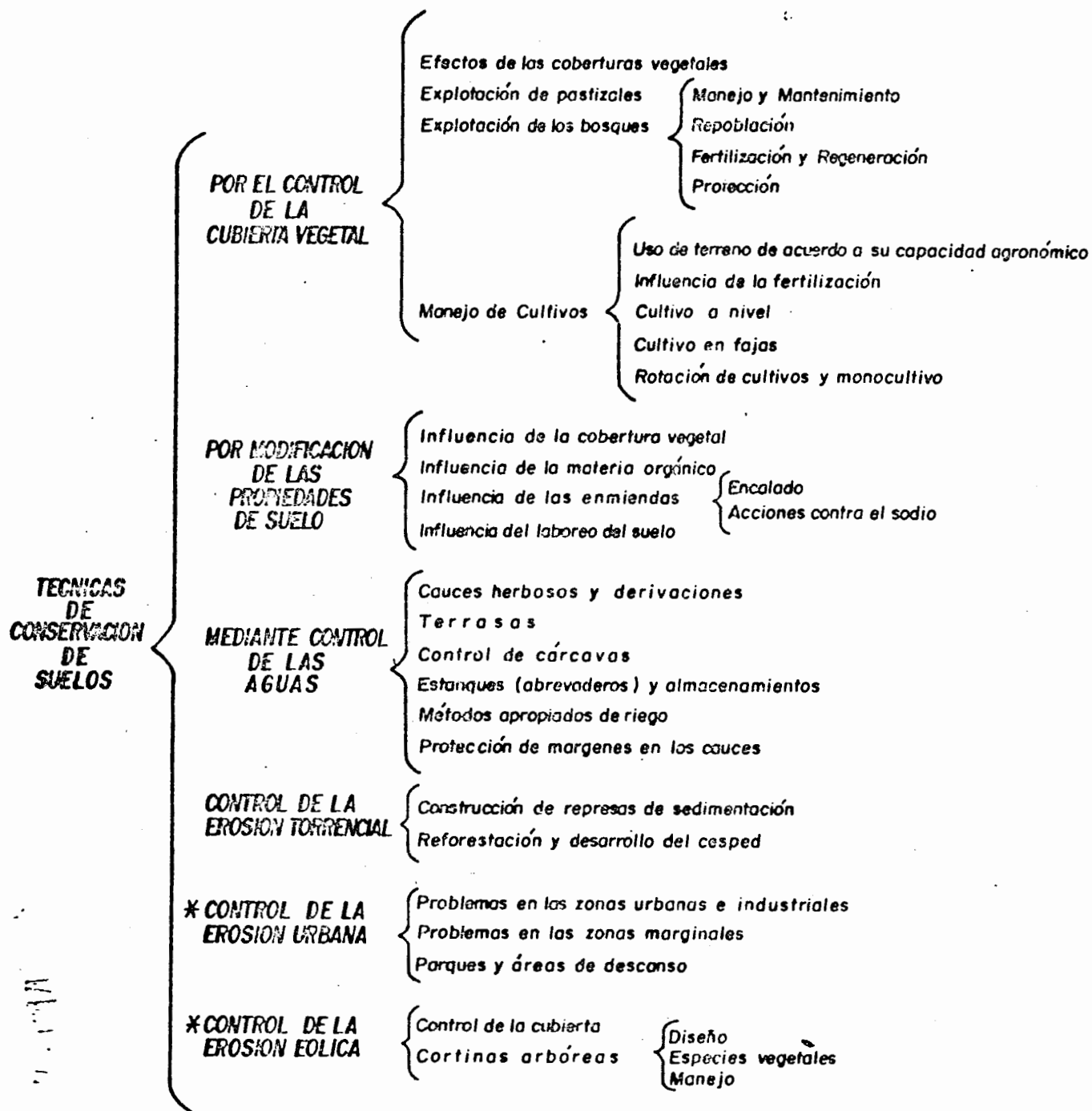
Otro tipo de clasificación general de las medidas de conservación de suelos, ha sido presentada en la referencia 57, página 15.

## 10.4 CONSERVACION DEL SUELO POR MEDIO DEL CONTROL DE LA CUBIERTA VEGETAL.

### 10.4.1 EFECTOS DE LAS COBERTURAS VEGETALES.

La vegetación es con toda seguridad el factor determinante en el mantenimiento -

# CUADRO SINOPTICO 10.1



\* NO SERA DESCRITO ESTE TEMA

del suelo, pues si es mantenida permanentemente en los terrenos, éstos son protegidos contra los ataques de la lluvia y del escurrimiento (ya descritos en el capítulo 2, inciso 3). Por otra parte, el hombre, cuando explota el potencial de los suelos para producir alimentos, debe manipular a la vegetación para seguir ofreciendo defensa al terreno contra la erosión (22,143), además, puede utilizarla para mejorar las propiedades de los suelos y ayudarlos en su resistencia a los procesos erosivos.

La vegetación presenta dos acciones a distintos niveles: una por encima del terreno y la otra a la altura del suelo. Por arriba del nivel del suelo, el efecto más importante es la intercepción de las gotas de lluvia, disminuyendo así el poder erosivo de éstas y reduciendo también, en parte el escurrimiento.

A la altura del suelo, la vegetación interviene directamente en el escurrimiento, pues le opone una resistencia mecánica eficaz (22,146) y brinda una protección excelente al terreno, adicionalmente, este tapiz herbáceo se pega a los pequeños movimientos de las masas de suelo sin romperse, no favoreciéndose la erosión en canalillos, ni por consecuencia, la erosión en cárcavas.

#### 10.4.2 EXPLOTACION DE PASTIZALES.

Los pastos deben de ser aprovechados racionalmente para que puedan cumplir con la función de tapiz herbáceo, ello requiere la solución a las siguientes cuestiones: densidad de ganado, rotación de éste, fertilización, etc.

Las praderas temporales, naturales o artificiales, empleadas comúnmente en la rotación de los cultivos, para mejorar las propiedades físicas del terreno, deben ser sometidas a las reglas esenciales de explotación para que permanezcan en condiciones satisfactorias, entrando en juego las cuestiones ya citadas (22,150).

Por otro lado, la recuperación de aquellos terrenos de pastoreo y degradados, plantea problemas muy especiales.

#### 10.4.3 EXPLOTACION DE LOS BOSQUES.

El bosque es una formación vegetal de importancia esencial para combatir la erosión hídrica, pero este papel defensor es mejor, entre más racional es su explotación y mantenimiento.

La explotación de los bosques y la reforestación o repoblación forestal, plantean una serie de problemas a los que habrá que darles solución, entre ellos se tienen los cuatro siguientes (22,21):

- a. La explotación y cuidado del bosque en relación a la erosión de los terrenos.
- b. La regeneración y fertilización de los bosques.
- c. La repoblación, en lo relativo a la elección de las especies vegetales adecuadas.
- d. La protección de los bosques, contra los incendios, la tala clandestina y las contaminaciones atmosféricas.

Una discusión completa sobre los tópicos anteriores, puede ser encontrada en la referencia recomendada c y en la referencia 22, páginas 152 a 168.

#### 10.4.4 MANEJO DE CULTIVOS.

10.4.4.1 INTRODUCCION. La aplicación de ciertas técnicas agrícolas racionales y adaptadas a las condiciones edafológicas y climático-hidrológicas de la zona, pueden ayudar a conservar e incluso a mejorar las características de los terrenos cultivados y a mantener el potencial económico del suelo.

10.4.4.2 USO DEL TERRENO DE ACUERDO A SU CAPACIDAD AGROLOGICA. Lo primero que debe de tomarse en cuenta en una agricultura con prácticas de conservación, es la elección adecuada del uso cada clase agrológica, es decir, para cultivo, pas

tizal, reforestación o bosque, fauna silvestre, etc. (21,364).

Para llevar a cabo lo anterior, es necesario conocer ciertas características y propiedades de los suelos, después de lo cual, los suelos serán clasificados -- agronómicamente y con toda seguridad, no todos ellos resultarán factibles para el cultivo (35,11).

10.4.4.3 INFLUENCIA DE LA FERTILIZACION. La morfología y el desarrollo de las partes aéreas y subterráneas de las plantas, así como la disposición de ellas en el terreno de cultivo, determinan la capacidad de defensa de la vegetación contra la erosión.

Para ilustrar lo anterior se reproduce a continuación el cuadro VII de la referencia 22, página 169, donde se concentran los resultados obtenidos en Glen, -- Africa del Sur, con Maíz en un terreno con 5% de pendiente.

T A B L A 10.1

TRATAMIENTO	EROSION MEDIA ANUAL (Ton / Ha.)	ESCURRIMIENTO MEDIO ANUAL (%)
Suelo desnudo	11.45	31.9
Maíz sin fertilización	3.57	10.3
Maíz más NPK	3.13	8.5
Maíz más P y estiércol	2.93	7.6
Maíz más P y cubierta de rastrojo	2.94	6.6
Maíz más P y enterrado de rastrojo	2.08	6.2

10.4.4.4 CULTIVO A NIVEL (Cultivo en Contorno). En el cultivo a nivel todas -- las prácticas culturales se trazan partiendo de una línea o curva de nivel guía, que recorre el terreno transversalmente (21,370).

Los surcos trazados en contorno no solamente evitan la erosión, sino que tam-- bién retienen el agua y de ésta manera puede ser infiltrada. Sin embargo, el con-- trol efectivo de la erosión hídrica con esta técnica, es raramente alcanzable, -- pues los surcos pueden fácilmente llenarse con el agua de una tormenta importan-- te y derramar el exceso, originando pérdidas de suelo.

En general, la técnica del cultivo a nivel es efectiva en zonas con lluvias li-- geras y laderas de corta longitud y reducida pendiente, o bien, cuando se combi-- na con otras técnicas o medidas de control, como el cultivo en fajas o las te-- rrazas (95,427).

Los límites para la longitud de pendiente en cultivo en contorno son los defini-- dos en la TABLA 10.2 de la página siguiente (90,10).

10.4.4.5 CULTIVO EN FAJAS. En relación a esta técnica de conservación, existen 4 variantes, dependiendo de la forma y disposición de las fajas en el terreno, éstas son (21,372):

CULTIVO EN FAJAS EN CONTORNO, en este caso, la siembra se dispone en fa-- jas que siguen las curvas de nivel, siendo la anchura de las fajas irregu-- lar, debido a que rara vez se encuentran pendientes uniformes en el terre-- no.

CULTIVO EN FAJAS POR PARCELAS, las fajas son de anchura uniforme y dis-- puestas transversalmente a la pendiente, pero no necesariamente siguiendo

TABLA 10.2

PENDIENTE DEL TERRENO (%)	LONGITUD MAXIMA DE LA PENDIENTE ( m )
2	1 2 0
4 a 6	9 0
8	6 0
10	3 0
12	2 4
14 a 24	1 8

las curvas de nivel.

CULTIVO EN FAJAS CONTRAVIENTOS, ahora las fajas son de ancho uniforme y es es t n ubicadas transversalmente a la dirección del viento predominante.

CULTIVO EN FAJAS DE RETENCION, en este caso se dejan fajas de pastos que ocupan el espacio irregular que dejan las fajas cultivadas de anchura uniforme.

El ancho de las fajas depende de la pendiente del terreno y desarrollo de ella. En términos generales, el ancho o amplitud de las fajas varía de 18 a 45 metros (21,373).

Por otra parte, en la referencia 19, página 108 se recomiendan los anchos siguientes para las fajas.

TABLA 10.3

PENDIENTE DEL TERRENO (%)	ANCHURA DE LA FAJA ( m )
2 a 5	30 a 33
6 a 9	24
10 a 14	21
15 a 20	15

Esta disposición del cultivo debe sembrarse con una rotación de cultivos que se ajuste a la capacidad agronómica de los suelos, una rotación t pica podría ser: comenzar con una faja de cultivo de escarda (maíz, frijol, algodón), enseguida un cultivo forrajero, después un cereal, seguido de un forraje y así regresar al cultivo de escarda (95,428).

El cultivo en fajas se adapta a terrenos con pendientes de gran desarrollo y bastante regulares (95,429).

10.4.4.6 ROTACION DE CULTIVOS Y MONOCULTIVO. En general se requiere menos ener-

gía para laborar un terreno que está en buen estado de agregación, y a este respecto las rotaciones de cultivo son un excelente medio para lograrla y mantenerla. Las rotaciones deben de incluir pastos y leguminosas, lográndose con esto - dar flexibilidad al plan de conservación, pues permiten aplicar diversas combinaciones de técnicas o prácticas, además por medio de las rotaciones, el terreno se mantiene cubierto más tiempo y de esta forma se evita la pérdida de suelo.

Con respecto al monocultivo, éste trae algunos problemas graves como son la pérdida de suelo en terrenos con pendiente, las malas hierbas y las enfermedades, la dificultad para el abastecimiento de nitrógeno, etc.

Sin embargo, el nomocultivo de maíz, en terrenos planos y productivos, puede -- llevarse con éxito, si se utilizan, como es debido los fertilizantes y se manejan bien los residuos vegetales (21,366).

En la referencia 96, se dispone de un resumen orientado hacia la selección rápida y apropiada de las técnicas de conservación adecuadas a cada problema.

## 10.5 CONSERVACION DEL SUELO POR MODIFICACION DE SUS PROPIEDADES.

Cuando un suelo posee una enorme susceptibilidad a la acción erosiva del agua, - es necesario mejorar principalmente sus propiedades físicas (22,19). Para llevar a cabo lo anterior, se dispone de diversas prácticas, entre las cuales se - tienen aquellas que se describirán a continuación.

### 10.5.1 INFLUENCIA DE LA COBERTURA VEGETAL.

Como se indicó en el capítulo 2, la vegetación tiene un papel preponderante con tra la disgregación y destrucción de la estructura superficial del suelo. Pero además, las vegetaciones permanentes, como los pastos y los bosques, modifican favorablemente la estructura de los suelos, debido a la penetración de sus sistemas radiculares (95,423).

### 10.5.2 INFLUENCIA DE LA MATERIA ORGANICA.

La materia orgánica tiene una marcada influencia en las propiedades físicas y - químicas de los suelos, ya que, aumenta la estabilidad de la estructura y la -- permeabilidad, disminuye sus cohesión e incrementa también la capacidad para re tener agua; deduciéndose de lo anterior sus efectos benéficos.

### 10.5.3 INFLUENCIA DE LAS ENMIENDAS.

Las correcciones o enmiendas, ejercen también un marcado efecto en la estabilidad de los suelos. Se reconoce, por ejemplo, que los cationes intercambiables - tienen una influencia en la estabilidad estructural de los suelos (22,135) y a este respecto, la corrección de la acidez de un suelo por medio de el encalado permite mejorar sensiblemente su estructura.

El sodio tiene dos acciones nefastas en los suelos, la primera es un efecto caús tico sobre las plantas y la segunda, un efecto perjudicial, pues origina la de gradación de la estructura por dispersión de la arcilla, entonces la agregación del suelo se hace masiva y continua (22,136). Debido a lo cual, cualquier prác tica para controlar o reducir el sodio en los suelos será benéfica y evitará su erosión.

### 10.5.4 INFLUENCIA DEL LABOREO DEL SUELO.

De acurdo a su naturaleza y técnica de ejecución, el laboreo del suelo puede -- contribuir a mejorarlo pues sus efectos mecánicos, físicos e indirectamente bio lógicos, aumentan la penetración del agua en terrenos compactos e impermeables, ésa es por ejemplo, la función del subsolado y del dren topo.

## 10.6 TECNICAS DE CONSERVACION DE SUELOS MEDIANTE EL CONTROL DE LAS AGUAS.

### 10.6.1 CAUCES HERBOSOS Y DERIVACIONES.

Los cauces herbosos son salidas o desagües naturales o construídos ex profeso, con forma y dimensiones que permitan la evacuación del escurrimiento de un terreno, de una terraza o de alguna otra estructura, sin peligro de erosión en ellos debido a su cobertura vegetal, comúnmente pasto.

La capacidad mínima de los cauces herbosos será aquélla que resulte capaz de de salojar el escurrimiento originado por una tormenta de período de retorno igual a 10 años (90,14). La forma de su sección transversal podrá ser trapecial, triangular o parabólica, habiéndose encontrado que ésta última es la más común y satisfactoria.

Por último, respecto a su velocidad de diseño en general podrá variar de 2.4 m/seg. en suelos resistentes a la erosión, con cobertura de pasto de Bermuda y pendiente del terreno natural menor al 5%, a 0.8 m/seg. en suelos fácilmente erosionables y pendientes suaves del terreno (90,14).

Las derivaciones son canales construidos transversalmente a la pendiente del terreno, con un bordo de soporte en su lado inferior (lado de aguas abajo) y utilizados para recolectar el agua en exceso de ciertas áreas y conducirla a sitios donde es utilizada o eliminada sin peligro de erosión.

Las derivaciones que protegen terrenos agrícolas deben tener capacidad para evacuar el gasto máximo generado por una tormenta de período de recurrencia 10 años como mínimo y tendrán un bordo libre no menor de 10 cm. Las velocidades de diseño en estos canales serán las reportadas en la TABLA 10.4 siguiente (90,13).

TABLA 10.4

TEXTURA DEL SUELO	VELOCIDAD PERMISIBLE, EN M/SEG.			
	CANAL SIN VEGETACION	CON VEGETACION		
		POBRE	MEDIA	BUENA
Arena, Limo y Arena Limosa	0.46	0.46	0.61	0.91
Limo Arcilloso y Arena Limo Arcillosa	0.60	0.91	1.22	1.52
Arcilla	0.76	0.91	1.52	1.83

Mayor información sobre los criterios de diseño, normas de construcción y técnicas de conservación de cauces herbosos y canales de derivación, puede ser obtenida en la referencia 19, páginas 124 a 135.

#### 10.6.2 TERRAZAS.

10.6.2.1 OBJETIVO. Una TERRAZA es un bordo de tierra, o un bordo y un canal, -- construidos transversalmente a la pendiente, con una localización y espaciamiento factibles para interceptar el escurrimiento (90,12).

El objetivo de las terrazas es repartir una pendiente en varias pendientes cortas y llevar el escurrimiento a través del campo a una salida o desagüe protegido



do (21,373), en general se requieren terrazas en terrenos con pendientes de hasta el 2% y longitudes de 90 a 120 metros. Las terrazas es una de las mejores -- prácticas mecánicas de control de la erosión (2,5).

10.6.2.2 TIPOS. De una manera general, las terrazas se pueden clasificar en dos grandes tipos, según la forma en que controlan el escurrimiento, uno de ellos -- lo constituyen los sistemas de terrazas con pendiente y el otro tipo lo inte--- gran el sistema de terrazas a nivel (2,6).

En las terrazas con pendiente es escurrimiento colectado es llevado en un canal a un desagüe o salida estable. Los desagües pueden ser de dos tipos, cauces her-- bosos o salidas subterráneas de teja o tubo (drenes).

Las terrazas a nivel son construídas sin canal colector, almacenándose el escu-- rrimiento a lo largo del bordo. El final de la terraza es obstruído y el suelo absorbe el agua y hace las veces de salida o desagüe subterráneo. Este tipo de sistema es usado únicamente en suelos con moderada a alta permeabilidad, de ma-- nera que se infiltre rápidamente el escurrimiento y no exista el peligro de da-- ños por inundación al cultivo, o a la terraza por desbordamiento (2,7).

10.6.2.5 DISEÑO. Los sistemas de terrazas y sus salidas serán diseñadas para -- conducir y eliminar el escurrimiento creado por un aguacero de período de re-- torno de 10 años. Los desagües subterráneos serán diseñados para evacuar en 24 o 48 horas el volumen de escurrimiento originado, según si el cultivo por prote-- ger es en surcos o es un pastizal.

El espaciamiento entre terrazas, podrá ser determinado por la fórmula universal de pérdida de suelo (FUPS), despejando de ella la longitud de pendiente para la cual no se rebasa una determinada pérdida de suelo tolerable por los terrenos -- (generalmente menor de 11.2 Ton/Ha./año.), o por medio de la siguiente ecuación empírica (90,13):

$$EV = x S + y \quad (10.1)$$

donde:

EV = espaciamiento vertical máximo, en pies.

x = variable con valores entre 0.40 y 0.80 para terrazas con pendiente y 0.85 para terrazas a nivel, adimensional.

S = pendiente del terreno en pies por cada 100 pies (es decir, en %), adimen-- sional.

y = variable con valores que fluctúan entre 1 y 2. Los valores cercanos al lí-- mite superior se aplicarán a suelos resistentes a la erosión y a sistemas de cultivo que proveen protección al terreno durante los períodos críticos de erosividad.

La separación calculada por cualquiera de los dos métodos citados, se puede in-- crementar hasta un 10% para permitir un mejor alineamiento y evitar los obstácu-- los del terreno.

La longitud máxima de las terrazas con pendiente se estima en 480 metros (21,-- 374) y en 1,070 metros para las terrazas a nivel (90,13).

10.6.2.4 OTRAS RECOMENDACIONES. Las recomendaciones para su uso y otros crite-- rios de diseño sobre la sección transversal, la construcción y el mantenimiento de las terrazas, se encuentran con detalle en la referencia 19 (páginas 108 a -- 124) y en la referencia 84 se concentran diversos criterios y normas de diseño.

#### 10.6.3 CONTROL DE CARCAVAS.

El control de cárcavas es la estabilización de los barrancos o cárcavas activas por medio de técnicas vegetativas y estructurales, o por una combinación de am-- bas.



El tratamiento de una cárcava debe de considerar la necesidad de proteger y controlar la cuenca que drena a ella, entre las medidas factibles de adoptar están: la intercepción del escurrimiento por una derivación o una terraza, la retención del agua por la vegetación o ciertas medidas estructurales, el rellenado y construcción de un cauce herboso en su sitio, la estabilización por medio de bordos o diques y sus obras complementarias, como vertedores, etc. (2,19).

En la referencia 87, se dispone de una descripción detallada de las diversas técnicas o medidas para el control de las cárcavas, recomendándose su consulta.

#### 10.6.4 ESTANQUES (abrevaderos) Y ALMACENAMIENTOS.

10.6.4.1 INTRODUCCION. Los estanques y los almacenamientos son cuerpos de agua creados por excavación de un hoyo en el terreno, o por la construcción de una cortina o bordo de tierra transversalmente a un cauce o arroyo.

Se puede decir que la única distinción entre ambos es sólo su tamaño, sin embargo la práctica indica que los estanques generalmente son excavados y pequeños y los almacenamientos son construídos por medio de una cortina de tierra.

Los estanques y los almacenamientos sirven para varios propósitos, pudiendo prestar un servicio adicional, el control de la erosión (2,11).

10.6.4.2 TIPOS. Los estanques y los almacenamientos pueden ser divididos en dos tipos generales, de acuerdo a su técnica de construcción: almacenamientos con bordo o cortina de tierra y almacenamientos excavados.

Los primeros son usualmente construídos en áreas donde las pendientes del terreno varían de suaves a moderadamente fuertes y donde los valles de las corrientes permiten el almacenamiento del agua, con relativa facilidad.

En cambio los almacenamientos excavados son generalmente construídos en áreas normalmente planas y por su falta de capacidad estas obras son sólo factibles donde un pequeño abastecimiento es requerido, por ejemplo, como abrevadero.

10.6.4.3 SELECCION DE SU SITIO. Desde un punto de vista económico, un almacenamiento debe ser localizado donde el mayor volumen pueda ser embalsado con el menor dique o la mínima excavación. Adicionalmente, otras consideraciones deben de tomarse en cuenta, como concentración de escurrimientos, problemas de contaminación, ubicación en campo, etc. (2,12).

10.6.4.4 DISEÑO. El siguiente criterio de diseño sólo es aplicable a almacenamientos, cuyo producto de su capacidad o volumen en  $m^3$ . por su profundidad máxima en metros, sea menor de 1.128 millones.

Cuando no se cumpla la condición anterior, se deberá de efectuar el diseño siguiendo los lineamientos hidrológicos e hidráulicos que deben de adoptarse en el estudio de un pequeño embalse, sin embargo en todos los casos, la obra de excedencias o vertedor, será definida en base a un estudio acucioso de dimensionamiento y características funcionales.

En la TABLA 10.5 de la página subsecuente, se indican las profundidades mínimas recomendadas en más del 25% del área del almacenamiento, de acuerdo al clima de la zona y considerando pérdidas normales de evaporación e infiltración (2,13).

#### 10.6.5 METODOS APROPIADOS DE RIEGO.

Bajo este concepto se engloban la utilización de métodos apropiados de riego, de cultivo y de prácticas culturales, que mejor se adapten al tipo de suelos, pendientes, cultivo mismo y disponibilidad de agua (21,388).

En la actualidad se dispone de un número amplio de técnicas de riego, de entre las cuales se seleccionará aquélla que sea la más adecuada al terreno, cultivo y abastecimiento de agua, por ejemplo, se tienen:

1. Los riegos por gravedad de pie, ya sea por melgas, bancales, surcos, corrugaciones, surcos en contorno, etc.

TABLA 10.5

C L I M A	LLUVIA ANUAL (mm.)	PROFUNDIDAD MINIMA DEL AGUA (m)
Arido	< 254	4 . 27
Semiárido	254 a 508	3 . 66
Subhúmedo - Seco	508 a 762	3 . 05
Subhúmedo - Húmedo	762 a 1016	2 . 74
Húmedo	1016 a 1524	2 . 44
Superhúmedo	> 1524	1 . 83

2. Los riegos especiales, como la subirrigación, etc.
3. Los riegos modernos, como la aspersión y el goteo.

Además, todas las precauciones contra la erosión y el uso excesivo del agua, -- que se deben tomar en las zonas áridas, se aplicarán al llamado: Riego Complementario o de Auxilio, de las zonas semihúmedas y húmedas.

#### 10.6.6 PROTECCION DE LAS MARGENES DE LOS CAUCES.

El cauce de todo río o arroyo nunca es permanente, sino que va teniendo cambios debidos a ciertas causas, entre ellas: la acción erosiva en el extrados de las curvas, o las fluctuaciones del gasto líquido y sólido, etc. (53,47).

Y aunque el problema de la protección de las márgenes de un río, cae dentro de los problemas de la Hidráulica Fluvial, debe de ser contemplado en todo proyecto de protección y manejo de cuencas.

En las referencias 2, 90 y 53, se pueden encontrar los lineamientos y técnicas de protección o defensa de márgenes, desde medidas sofisticadas (muros rígidos y espigones) hasta disposiciones ingeniosas y económicas (en base a postes de madera, mallas de alambre, ramas, etc.).

#### 10.7 CONTROL DE LA EROSION TORRENCIAL.

##### 10.7.1 INTRODUCCION.

La eficiencia en la corrección de un torrente depende esencialmente de la naturaleza y magnitud de los trabajos llevados a cabo y por lo común, deben asociarse y combinarse varios tipos de acciones. Por ejemplo, la corrección de un torrente por medio de estructuras como los diques, que se opongan a las socavaciones, deslizamientos y avalanchas (no comunes en México), constituye un medio de intervención directa y rápida, pero debe ser necesariamente complementada con trabajos biológicos que tienen como objetivo, el mantenimiento, la mejora o la creación de una cubierta vegetal apropiada, cuya acción o influencia es a largo plazo pero duradera (22,198).

##### 10.7.2 CORRECCION POR MEDIO DE DIQUES.

Los diques elevan el nivel del lecho, se oponen a la socavación del cauce y evitan el derrumbamiento de las orillas. El método clásico consiste en disponerlos en "escalera", cuya separación es teóricamente solo función de su altura y de la pendiente del torrente, de esta manera los materiales, sobre todo los gruesos, son retenidos por estas cortinas y se van eliminando así los problemas.

Conviene seguir un orden cronológico en la construcción de estas obras y así -- por ejemplo, primero se realizarán los trabajos en las cuencas de recepción, -- después en los barrancos afluentes y por último, en el torrente principal de -- arriba hacia abajo (22,200).

Aunque por lo común estos diques son de tamaños reducidos, no debe descuidarse su diseño hidráulico, hidrológico y estructural.

#### 10.7.3 PRESAS DE SEDIMENTACION.

No siempre es posible tratar un torrente con diques en escalera, pues cuando -- los torrentes presentan una conformación topográfica en gargantas estrechas y -- rocosas, puede llegar a ser más económico y eficaz construir sólo una gran presa. Este tópico ya fue discutido en el capítulo 9, inciso 3.4 .

#### 10.7.4 OTRAS OBRAS DE PROTECCION.

Dependiendo del problema específico que se ataca, puede ser más conveniente la corrección por medio de otro tipo de obras como son: la estabilización o anclaje de las laderas, los diques laterales de protección, o bien, los trabajos en los conos de deyección.

#### 10.7.5 TRABAJOS BIOLÓGICOS.

Los trabajos biológicos incluyen la repoblación forestal, el encespedamiento y el reverdecimiento del terreno. Para mayores detalles se sugiere consultar la referencia 22, páginas 204 a 210.

## CONCLUSIONES GENERALES DEL TRABAJO:

### PRIMERA:

En todo estudio sobre la sedimentación que sufrirá un embalse, el cálculo más importante y a la vez el más difícil, es con toda seguridad la cuantificación de la aportación de sedimentos de la cuenca.

Aunque se dispone de variadas técnicas para la estimación de la aportación de sedimentos (inciso 2 del capítulo 3), debido a la escasez de datos en nuestro país, su cuantificación es sumamente incierta, sobre todo cuando se estudian pequeños embalses. En todos los casos, la información que proporcionan los reconocimientos batimétricos en embalses próximos al sitio de análisis, es una importante ayuda para llegar a valores más apegados a la realidad.

Los estudios batimétricos requieren de una inversión inicial en equipo y capacitación del personal, pero son a largo plazo una de las técnicas más económicas para adquirir información, que permita mejorar las estimaciones de la aportación de sedimentos.

### SEGUNDA:

Tomando en cuenta que los mejores criterios para la estimación de la aportación de sedimentos de una cuenca, son aquéllos que se basan en la información del muestreo de sedimentos en las corrientes, como por ejemplo: las técnicas de procesamiento de tales datos, los métodos o criterios de la Hidráulica Fluvial y los modelos de simulación; siempre se deberá de procurar instalar como mínimo una estación de registro o muestreo de sedimentos en el sitio propuesto para el embalse y preferentemente ubicar varias en el área, para poder seleccionar el mejor sitio para el emplazamiento de las obras, cuando esto sea posible.

Esta estrategia ya se lleva a cabo, en los estudios de los grandes embalses y se debe tender a hacerla extensiva al caso de los medianos y pequeños almacenamientos y de ésta manera recabar información durante el tiempo que transcurra entre el inicio de los estudios y la construcción de la presa.

Para salvar las dificultades impuestas por la lejanía y falta de personal para la operación de tales estaciones de muestreo de sedimentos, se considera que serán de enorme utilidad las instalaciones automáticas elementales y los llamados tanques de sedimentación, para cuantificar el transporte de fondo de la corriente.

### TERCERA:

La determinación del peso volumétrico de los sedimentos ya depositados, la estimación de la eficiencia de retención del vaso, la simulación de la pérdida de capacidad del embalse debida a la sedimentación y la predicción de la distribución de los sedimentos dentro del vaso, son cálculos que deben de ser realizados con cuidado y cierto criterio, pero en general, fáciles de llevar a cabo.

### CUARTA:

En relación con los criterios expuestos para determinar el peso específico de los sedimentos depositados y la eficiencia de retención, se insiste una vez más que para su aplicación precisa se debe de conocer la distribución granulométrica de los sedimentos que llegarán al embalse, así como el tipo y características de la operación del vaso.

Por otra parte, respecto a los dos métodos presentados para llevar a cabo la dis

tribución de los sedimentos en el vaso, se debe aclarar que uno de ellos es matemático (Area-Incremento) y el otro empírico (Area-Reducción) y que ambos toman en cuenta ciertos factores que influyen en la localización de los sedimentos en el vaso, pero no consideran otros. En resumen son dos técnicas aproximadas para realizar el pronóstico requerido y se deben de tomar con reservas sus resultados cuando el volumen de materiales sólidos que se acumulará en el vaso es importante y el embalse se aparta de la forma típica.

#### QUINTA:

Tomando en cuenta que la aportación de sedimentos está íntimamente ligada con la pérdida de suelo en la cuenca, quizás la técnica más efectiva para combatir la sedimentación de los embalses sea la reducción de la erosión en su cuenca.

En el capítulo 10 se han descrito las diversas medidas y obras para combatir la erosión en la cuenca, pensando que en los proyectos en los que se prevea una sedimentación drástica o importante, se estudien desde el inicio de la operación e inclusive antes de la construcción, las medidas necesarias para disminuir la aportación de sedimentos y prolongar la vida del embalse (represas para sedimentos, manejo de cultivos, reforestación, etc.).

En todo caso un estudio económico de las medidas propuestas y del proyecto debe ser realizado, para llegar a la solución óptima del problema.

La ciencia nos ha prometido la verdad,  
pero nunca nos ha prometido ni la paz,  
ni la felicidad.

GUSTAVO LEBON

## ANEXO I: EVALUACION DE LOS TERMINOS DE LA FORMULA UNIVERSAL DE -- PERDIDA DE SUELO (FUPS).

### I.1 INTRODUCCION.

La FUPS es un modelo de erosión, diseñado para predecir las pérdidas de suelo pro medio y a largo plazo, de un área específica (97,3)\*.

La ecuación representa la culminación de un número importante de experiencias y - ensayos en parcelas experimentales, llevados a cabo por sus autores, Wischmeier y Smith y un grupo de colaboradores, además, dicha fórmula, marca definitivamente - un paso hacia adelante, después de más de 10 años, en que apareció uno de los pri- meros intentos para cuantificar los factores que influyen en la erosión hídrica, éste fue debido a G.W. Musgrave y puede ser consultado en la referencia 59.

La FUPS es (97,4):

$$E = \alpha R K L S C P \quad (I.1)$$

siendo:

E = pérdida de suelo estimada por unidad de área, expresada en las mismas unida-- des seleccionadas para el factor K y para el período adoptado en el factor R. Usualmente, E se calcula en Ton/km<sup>2</sup>/año, pero otras unidades pueden ser utili- zadas.

$\alpha$  = coeficiente de conversión de sistema inglés (ton/acre/año) a métrico (Ton/Km<sup>2</sup>/ año), en este caso igual a 224.2 y por lo tanto, todos los términos de la FUPS serán empleados en su forma original, como fueron definidos por sus autores.

R = factor del potencial erosivo de la lluvia y el escurrimiento, es el número de unidades del índice de erosión por lluvia EI (ver Anexo II, siguiente), adi-- mensional.

K = factor de erosionabilidad del suelo, es la pérdida de suelo, por unidad del -

\* El primer número indica la referencia bibliográfica consultada y el segundo, su página.

índice de erosión por lluvia, para un suelo específico y medida en una parcela unitaria, la cual fue definida de longitud 72.6 ft. y pendiente del 9%, - continuamente en barbecho y libre de labranza.

L = factor de longitud de la pendiente, es la relación de la pérdida de suelo -- del terreno de cierta longitud, entre aquélla correspondiente a 72.6 ft. de longitud, bajo idénticas condiciones, adimensional.

S = factor de magnitud de la pendiente, es el cociente de la pérdida de suelo del terreno de determinada pendiente, entre aquélla relativa a una pendiente del 9% bajo idénticas condiciones, adimensional.

C = factor de cobertura vegetal y manejo de ésta, es la relación de la pérdida - de suelo de un área con cobertura y manejo específicos, a la correspondiente a un área idéntica en barbecho continuo, adimensional.

P = factor de prácticas de control, es el cociente de la pérdida de suelo con -- prácticas de control (contorneo, cultivo en fajas, terrazas), entre aquélla - correspondiente a surcos en el sentido de la pendiente, adimensional.

## I. 2 FACTOR DE EROSIONABILIDAD DEL SUELO (K).

### I.2.1 INTRODUCCION.

Algunos suelos son más fácilmente erosionables que otros, bajo condiciones semejantes o idénticas, ésta diferencia causada por las propiedades de cada suelo, es lo que se denomina: Erosionabilidad del Suelo (97,8).

Por otra parte, las diferencias en la susceptibilidad natural de los suelos a la erosión, son bastante difícil de cuantificar a partir de observaciones de campo, pues por ejemplo, un suelo que tiene un bajo factor de erosionabilidad, puede -- mostrar signos de fuerte erosión si se encuentra en terrenos de pronunciada pendiente, o en una zona de lluvias de alta intensidad.

Por el contrario, un suelo con un factor de erosionabilidad alto, puede presentar poca evidencia de erosión, si se localiza en una zona de tormentas ligeras o en un terreno de pendiente corta y suave.

### I.2.2 NOTAS RELATIVAS AL USO DE LAS AYUDAS DE CALCULO DEL FACTOR K.

NOTA 1: Los datos sobre las pérdidas de suelo mostraron que la arena muy fina (- con tamaños entre 0.05 y 0.10 mm.), es comparable en erosionabilidad a - las partículas de limo.

Por ésta razón, los nomogramas de cálculo de K incluyen como dato de entrada la suma de sus porcentajes.

NOTA 2: En relación al porcentaje de materia orgánica (% M.O.), se puede aceptar la siguiente correspondencia, de acuerdo a la referencia 92, páginas 4 y 9:

0% M.O. = contenido BAJO, suelos claros de las regiones semiáridas.

2% M.O. = contenido MODERADO, suelos moderadamente oscuros de las áreas con vegetación arbustiva.

4% M.O. = contenido ALTO, suelos oscuros de las zonas boscosas.

NOTA 3: La estructura del suelo se refiere al agrupamiento de las partículas primarias del suelo, en su agregación natural, llamados: Fragmentos.

Estos fragmentos son descritos por su forma (Tipo de Estructura), su estado de agregación o de unión (Grado de Estructura) y su tamaño (Clase - de Estructura).

En general, la clase o tamaño (en milímetros) de los fragmentos difieren con el tipo de estructura, como se ilustra en la TABLA I.1 de la página siguiente (92,4).



CLASE	TIPO DE ESTRUCTURA, EN mm.			
	Granular	Laminar	Bloques	Priamática.
muy fina	<1	<1	<5	<10
fina	1 a 2	1 a 2	5 a 10	10 a 20
media	2 a 5	2 a 5	10 a 20	20 a 50
gruesa	5 a 10	5 a 10	20 a 50	50 a 100

NOTA 4: El contenido de fragmentos gruesos se estima en porcentaje por volumen, tomando una muestra de suelo de 5.08 cm. de espesor, si se estudia la capa superficial del terreno, o de mayor espesor si se analiza el subsuelo (92,4).

Entonces, de acuerdo a la TABLA I.1 anterior y según el tipo de estructura del suelo, serán los límites adoptados para definir cuáles son los fragmentos gruesos. Si por ejemplo, la estructura es granular, los fragmentos gruesos serán aquellos con tamaños comprendidos entre 5 y 10 mm. Se cuantifica su contenido en % de volumen de la muestra de suelo y tal valor constituye el "contenido de fragmentos gruesos".

NOTA 5: La permeabilidad del suelo puede ser estimada de una manera práctica, en base a los datos siguientes:

- 1) Estructura del suelo, incluyendo tipo, grado y clase.
- 2) Textura del suelo, utilizando los porcentajes de arcilla, limo y arena.
- 3) Contenido de fragmentos gruesos, en porcentaje del volumen.

En el nomograma de la Fig. I.1 de la página siguiente, se llevan los datos o características anteriores y se obtiene una estimación rápida pero aproximada de la permeabilidad del suelo en análisis(92,5).

NOTA 6: La TABLA I.2 siguiente permite obtener una estimación del factor de erosionabilidad del suelo K, de acuerdo a la textura y permeabilidad del suelo (12,30).

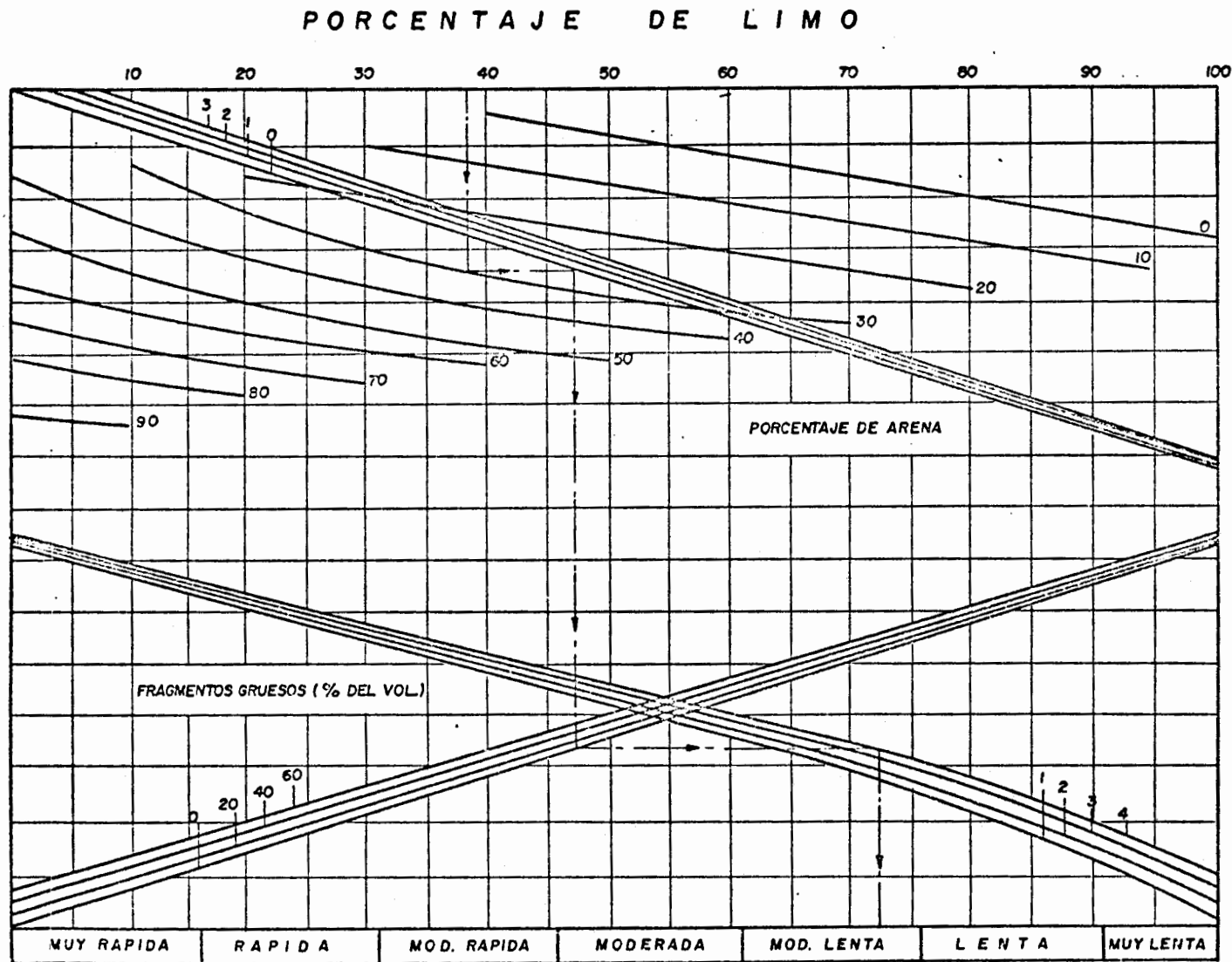
TABLA I.2  
VALORES DEL FACTOR DE EROSION K

TEXTURA DE LA SUPERFICIE DEL SUELO	PERMEABILIDAD			
	MUY LENTA	LENTA	MODERADA	RAPIDA, MUY RAPIDA
Arcilloso, Arcillo-Ilmoso, Arcillo-Arenoso	0.37	0.32	0.28	0.24
Limo-Arcilloso, Limo-Arcillo-Arenoso	0.43	0.37	0.32	0.28
Limo, Limo y arena muy fina	0.49	0.43	0.37	0.32
Limo y arena fino, Limo-Arenoso	0.37	0.32	0.24	0.20
Arena, Arena-Limo-Arcilloso, Arena-Ilmoso	0.28	0.24	0.20	0.17 a 0.15



Fig. I.1

# NOMOGRAMA PARA EVALUACION DEL TIPO DE PERMEABILIDAD DEL SUELO



## GRADO DE ESTRUCTURA

- 0 - Sin estructura
- 1 - Débil
- 2 - Moderada
- 3 - Fuerte

## TIPO DE ESTRUCTURA

- 1 - Granular muy fina
- 2 - Granular fina o granos sueltos
- 3 - Mediana o granos gruesos
- 4 - Masiva, Laminar, Esferoidal o Columnar

FIG. I.1

NOTA 7: En la Fig. I.2 de la página subsecuente, se ha reproducido el nomograma propuesto por Wischmeier y Smith (97,11), para el cálculo del factor de erosionabilidad K, el cual toma en cuenta la textura, el contenido de materia orgánica y la permeabilidad del suelo.

En la Fig. I.3 de la página número 139, se tiene el nomograma sugerido por R.K. Tew para la estimación del factor K (92,9), el cual considera además, el contenido de fragmentos gruesos en el suelo.

Este autor ha dividido la erosionabilidad de los suelos en tres categorías, de acuerdo al valor que adopta el factor K, éstas son (92,9):

Erosionabilidad BAJA:  $0 < K < 0.20$

Erosionabilidad MODERADA:  $0.20 < K < 0.40$

Erosionabilidad ALTA:  $K > 0.40$

Los dos nomogramas anteriores (Fig.I.2 y Fig.I.3) permiten estimar el valor del factor K, en sistema inglés.

NOTA 8: Un enfoque diferente y sumamente confiable y preciso, para la evaluación del factor K en suelos tropicales, se puede consultar en la referencia recomendada d.

### I.3 FACTOR DE TOPOGRAFIA DEL TERRENO (LS).

La longitud y la pendiente del terreno, afectan sustancialmente la magnitud de la erosión del suelo por el agua. Los dos efectos (de la longitud y de la pendiente), fueron evaluados por separado en las investigaciones iniciales e introducidos en la FUPS, por los términos o factores L y S, respectivamente (97,12).

Sin embargo, en las aplicaciones prácticas, considerar los dos factores como uno sólo llamado: Factor de Topográfico LS, es más conveniente.

LS es el cociente entre la pérdida de suelo por unidad de área de un terreno de 72.6 ft. de longitud y 9% de pendiente uniforme y la pérdida correspondiente a otro terreno, bajo idénticas condiciones, pero de longitud y pendiente diferentes.

El factor o parámetro LS, se estima con ayuda de la Fig. I.4 de la página número 140 (97,58).

### I.4 FACTOR DE COBERTURA VEGETAL Y MANEJO DE ELLA (C).

#### I.4.1 INTRODUCCION.

Las consecuencias de la cobertura vegetal y su manejo, en las pérdidas de suelo, no pueden ser evaluadas independientemente, porque sus efectos combinados están influenciados por muchas interrelaciones.

Siempre un cultivo puede crecer continuamente o en rotaciones y estas secuencias influyen en el lapso entre las sucesivas coberturas de cultivo y también afectan los beneficios obtenidos del manejo de los residuos de las cosechas (97,17).

Los residuos de las cosechas pueden ser removidos, dejados en la superficie, o bien, incorporados cerca de la superficie o en los surcos y aunado a lo anterior, está la disponibilidad de ellos en el terreno, para definir la efectividad de su manejo contra la erosión.

#### I.4.2 DETERMINACION DEL FACTOR C PARA LAS DIFERENTES COBERTURAS VEGETALES.

En la TABLA I.3 de la página número 141, se puede obtener el valor del factor C para áreas de cultivo (77,180); de la TABLA I.4 de la página número 142, se obtendrá la magnitud del factor C para terrenos en descanso, pastizales o zonas con vegetación arbustiva (81,3-16) y por último, en la TABLA I.5 de la página número 143, se podrá calcular el valor del factor C para las regiones boscosas.

FIG. I.2

NOMOGRAMA PARA LA EVALUACION DEL FACTOR DE EROSIONABILIDAD DEL SUELO K

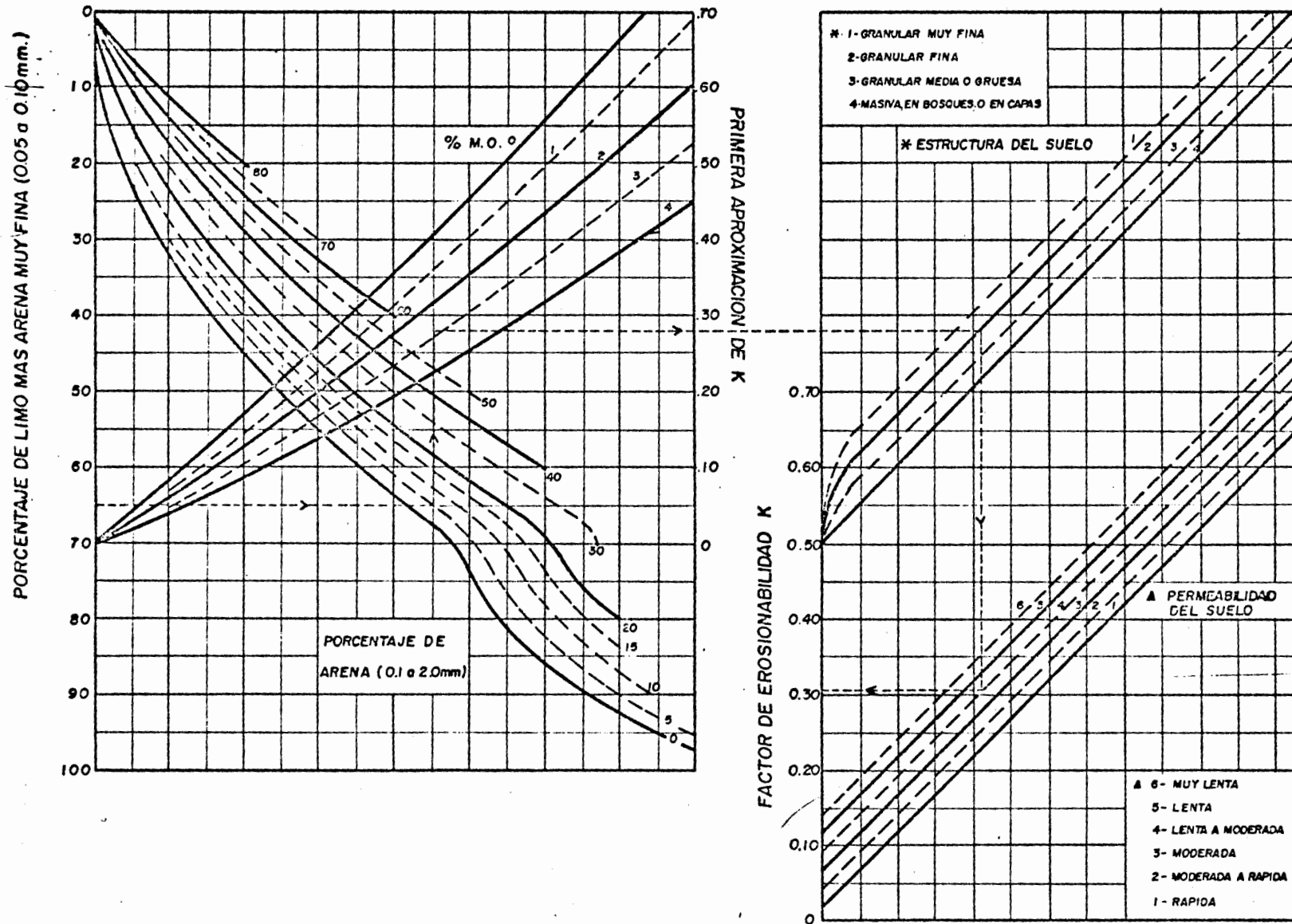


FIG. I.2

FIG. I.3

NOMOGRAMA PARA LA EVALUACION DEL FACTOR DE EROSIONABILIDAD DEL SUELO K

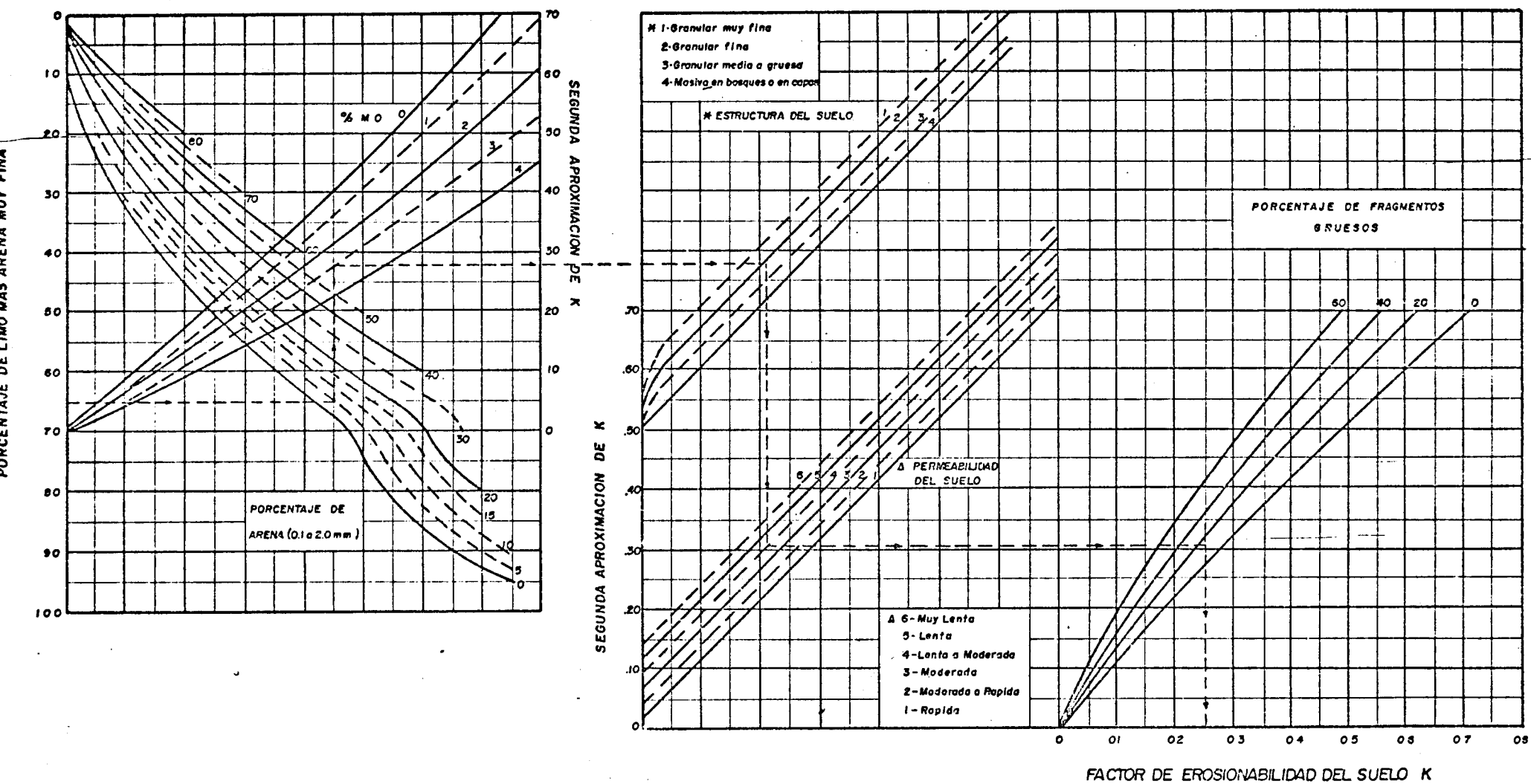


Fig. I. 4

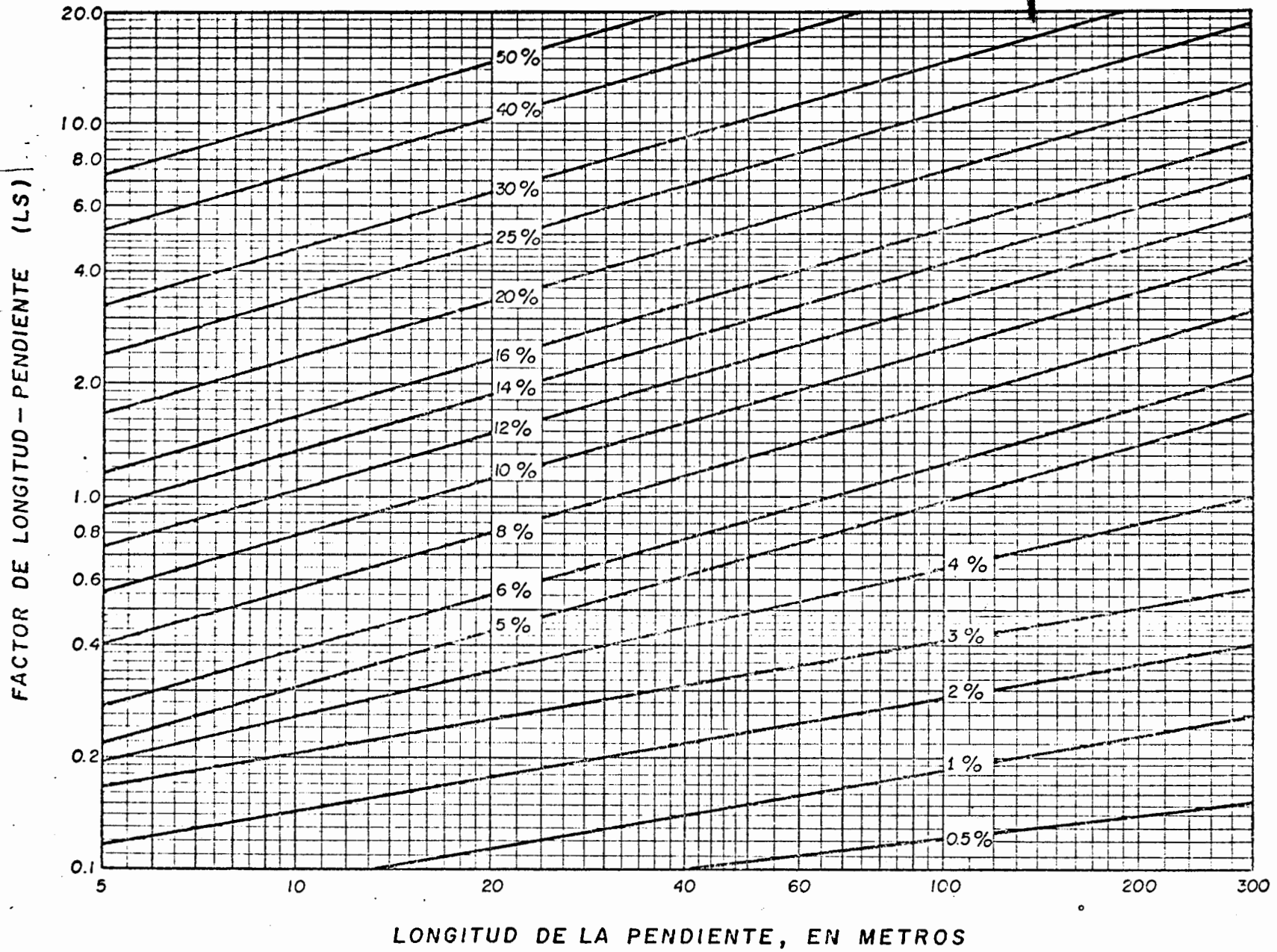


Fig. I. 4

T A B L A I . 3  
VALORES DEL FACTOR C PARA AREAS DE CULTIVO

SECUENCIA DEL CULTIVO	RENDIMIENTO DEL CULTIVO		ETAPA DEL CULTIVO				
	PRADERA (Ton.) <sup>1</sup>	GRANO (bu) <sup>2</sup>	F (%)	I (%)	2 (%)	M (%)	4 (%)
1º Año de maíz después de pradera, RdL	2	60	15	30	27	15	22
2º Año de maíz después de pradera, RdL	3	70	32	51	41	22	26
2º Año de maíz después de pradera, RdR	3	70	60	65	51	24	65
3º o más años de maíz, RdL	—	70	36	63	50	26	30
Pequeños granos con pradera y con residuos del cultivo anterior en la superficie :							
1º Año de maíz después de pradera.	2	60	—	30	18	3	2
2º Año de maíz después de pradera.	2	60	—	40	24	5	3
Pequeños granos después del 1º año de maíz y residuos removidos.	2	—	—	50	40	5	3
Establecimiento de pasto y prado de legumbres.	3	—	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4

Ton. inglesas = 2,000 lbs = 907 Kg.

bu = Peso seco / acre

bu = 4 peck = 35.24 litros

F = Barbecho

I = Primer mes después de la siembra

2 = 2º

M = Madurez del cultivo o cosecha

4 = Residuo o rastrojo

RdR = Residuos removidos

RdL = Residuos dejados en el terreno

VALORES DE C PARA PASTIZALES Y TERRENOS EN DESCANSO Y FORESTALES<sup>1</sup>

COBERTURA VEGETAL		COBERTURA DEL TERRENO						
TIPO Y ALTURA <sup>2</sup>	% DE COBERTURA <sup>3</sup>	TIPO <sup>4</sup>	PORCENTAJE DE COBERTURA					
			0	20	40	60	80	95-100
(A) Ninguna		G	0.45	0.20	0.10	0.042	0.012	0.003
		W	0.45	0.24	0.15	0.091	0.043	0.011
(B) Hierba o Maleza corta (0.5m.)	25	G	0.36	0.17	0.09	0.038	0.013	0.003
		W	0.36	0.20	0.13	0.083	0.041	0.011
	50	G	0.26	0.13	0.07	0.035	0.012	0.003
		W	0.26	0.16	0.11	0.076	0.039	0.011
	75	G	0.17	0.10	0.06	0.032	0.011	0.003
		W	0.17	0.12	0.09	0.068	0.038	0.011
(C) Maleza o Arbustos (2m.)	25	G	0.40	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
		W	0.40	0.22	0.14	0.087	0.042	0.011
	50	G	0.34	0.16	0.08	0.038	0.012	0.003
		W	0.34	0.19	0.13	0.082	0.041	0.011
	75	G	0.28	0.14	0.08	0.036	0.012	0.003
		W	0.28	0.17	0.12	0.078	0.040	0.011
(D) Arboles (no arbustos pequeños) (4m.)	25	G	0.42	0.19	0.10	0.041	0.013	0.003
		W	0.42	0.23	0.14	0.089	0.042	0.011
	50	G	0.39	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
		W	0.39	0.21	0.14	0.087	0.042	0.011
	75	G	0.36	0.17	0.09	0.039	0.013	0.003
		W	0.36	0.20	0.13	0.084	0.041	0.011

1. Todos los valores mostrados consideran: a) distribución aleatoria de cobertura o vegetación y b) cobertura vegetal de altura apreciable donde existe. Los terrenos en descanso se refieren a áreas con suelos no alterados por un período precedente de 3 años consecutivos.
2. Altura de caída promedio de las gotas de lluvia desde la vegetación a la superficie del suelo: m = metros.
3. Proporción del área total a el área que es ocultada por la vegetación en una proyección vertical (en forma aproximada).
4. G: cobertura de la superficie por pasto, plantas semejantes al pasto, residuos descompuestos compactados, o suelo cubierto con paja como mínimo en 5.08 - cm. de espesor.  
  
W: la cobertura en la superficie está constituida principalmente por plantas herbáceas, tales como plantas con reducida red de raíces lateral cerca de la superficie y/o residuos no deteriorados.

TABLA I.5  
VALORES DEL FACTOR C PARA BOSQUES

COBERTURA DE ARBOLES (1) (% del área)	CUBIERTA FORESTAL (2) (% del área)	VEGETACION INFERIOR (3)	FACTOR C
1 a. 100 - 75	100 - 90	CONTROLADA (4)	0.001
		SIN CONTROL (4)	0.003 a 0.011
2 a. 70 - 40	85 - 75	CONTROLADA	0.002 a 0.004
		SIN CONTROL	0.01 a 0.04
3 a. 35 - 20	70 - 40	CONTROLADA	0.003 a 0.009
		SIN CONTROL	0.02 a 0.09 (5)

- (1) Cuando la cobertura de árboles es menor del 20%, el área debe ser considerada como pastizal o terreno de cultivo para estimar la pérdida de suelo (ver TABLA I.4).
- (2) Se considera cobertura forestal la última capa de 5.08 cm. de espesor sobre el porcentaje de área cubierta.
- (3) Vegetación inferior es definida como arbustos, hierbas, pastos, etc., en el área del terreno no protegida por la cobertura forestal.
- (4) Se entiende por vegetación inferior "controlada", cuando el pastoreo y los incendios son controlados y "sin control", las áreas sometidas a excesivo pastoreo o sujetas a repetidos incendios o quemas.
- (5) Para bosques sin control con cobertura de paja menor del 75%, los valores de C deben ser obtenidos considerando el 70% de los valores apropiados de la TABLA I.4.

El valor de 0.70 es un factor de ajuste para considerar que los suelos del bosque tienen más altos contenidos de materia orgánica.

TABLA I.6

PENDIENTE DEL TERRENO (%)	CULTIVO A NIVEL	CULTIVO EN FAJAS DE CONTORNO	TERRAZAS	
			CON CAUCES HERBOSOS COMO DESAGÜES	CON DESAGÜES SUBTERRANEOS
1 a 2	0.60	0.30	0.12	0.05
3 a 8	0.50	0.25	0.10	0.05
9 a 12	0.60	0.30	0.12	0.05
13 a 16	0.70	0.35	0.14	0.05
17 a 20	0.80	0.40	0.16	0.06
21 a 25	0.90	0.45	0.18	0.06



En relación con la TABLA I.3, ésta fue tomada de la referencia 77 como ya se indicó, sin embargo, una tabla de este tipo más completa puede ser obtenida en la referencia recomendada o, página 15.

Por otra parte, bastante información para la evaluación del factor C, se puede consultar en la referencia 97.

#### I.4.3 DETERMINACION DEL FACTOR C GLOBAL EN AREAS NATURALES.

W.H. Wischmeier ha propuesto un criterio para la evaluación del factor C en áreas naturales (102,1), éste criterio está concentrado en las tres figuras de la página siguiente. Según el autor la influencia total o global en el factor C de la vegetación, puede ser dividida en tres efectos distintos, éstos son:

##### TIPO I: EFECTOS DE LA COBERTURA VEGETAL.

La cobertura vegetal intercepta la lluvia, desde donde las gotas caen ya no con su velocidad libre de caída. Entonces, la cobertura vegetal reduce la erosividad de la lluvia y su energía de impacto en la superficie del suelo (102,2).

La magnitud de tal disminución depende de la altura y densidad de la cobertura, como se observa en la Fig. I.5 .

##### TIPO II: EFECTOS DEL TAPIZ HERBOSO.

El tapiz herboso, es decir, la vegetación que se desarrolla en contacto directo con el suelo, es mucho más efectiva en su acción protectora contra la erosión, que su equivalente porcentaje de cobertura vegetal, y hay dos razones que justifican lo anterior (102,3): la intercepción de las gotas de lluvia es total y ya no existe una altura de caída remanente y por otra parte, el efecto de esta cubierta herbosa en el escurrimiento, reduciendo su velocidad y por lo tanto, su potencial erosivo (disgregación y transporte).

Los resultados en el simulador de lluvia, sobre la efectividad en la reducción de la erosión de diversos tipos y magnitudes de tapices herbosos, no son todavía -- disponibles. La extrapolación de los datos obtenidos en bosques y zonas con vegetación arbustiva, a otros tipos de cubiertas, se ha propuesto expresando a éstas en porcentaje de superficie cubierta del suelo, en lugar de hablar de las Ton/acre de tapiz herboso.

La relación inicialmente propuesta se tiene en la Fig. I.6 .

##### TIPO III: EFECTOS RESIDUALES DEL USO DEL TERRENO.

Aquí se incluyen aquellos efectos residuales en la estructura del suelo, en el contenido de materia orgánica y en la densidad del suelo; a este respecto se considerarán el efecto del laboreo o la falta de éste en la rugosidad y porosidad de la superficie del terreno, raíces y tallos, efectos biológicos y probablemente otros factores.

Este factor se evalúa con la Fig. I.7 .

El factor de cobertura y manejo C global para zonas o áreas naturales será igual al producto de los tres subfactores correspondientes a los efectos I, II y III, previamente definidos. Mayores detalles sobre este criterio pueden ser obtenidos en la referencia 102.

#### I.5 FACTOR DE PRACTICAS DE CONTROL (P).

En general, donde un suelo con pendiente considerable va a ser cultivado y ex- puesto a las lluvias erosivas, la protección con el encespedamiento y el desarrollo denso o próximo de los cultivos, debe ser ayudado con ciertas prácticas que harán más lenta la circulación del escurrimiento y que por lo tanto, reducirán la cantidad de suelo erosionado.

Las prácticas de control más importantes en las zonas de cultivo son: el laboreo en contorno o cultivo a nivel, el cultivo en fajas de contorno y los sistemas de terrazas; en las otras área de una cuenca son: terrazas, cauces herbosos, control de cárcavas y la corrección de torrentes.

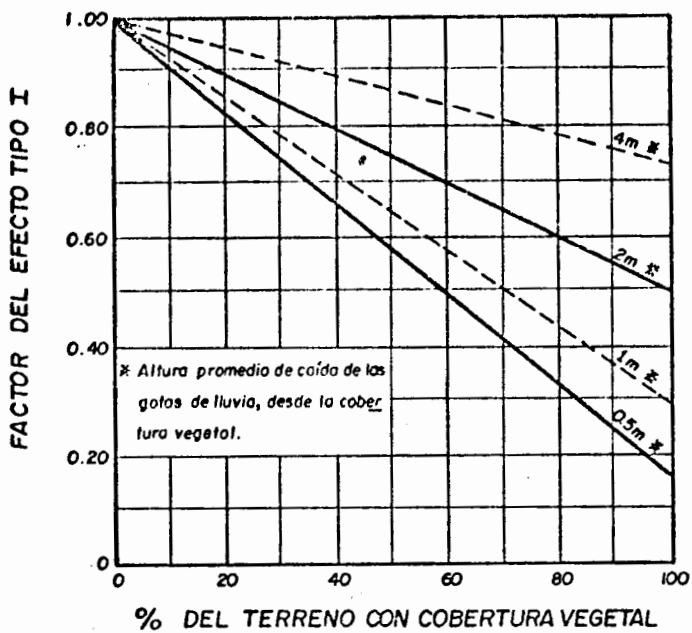


Fig. I.5

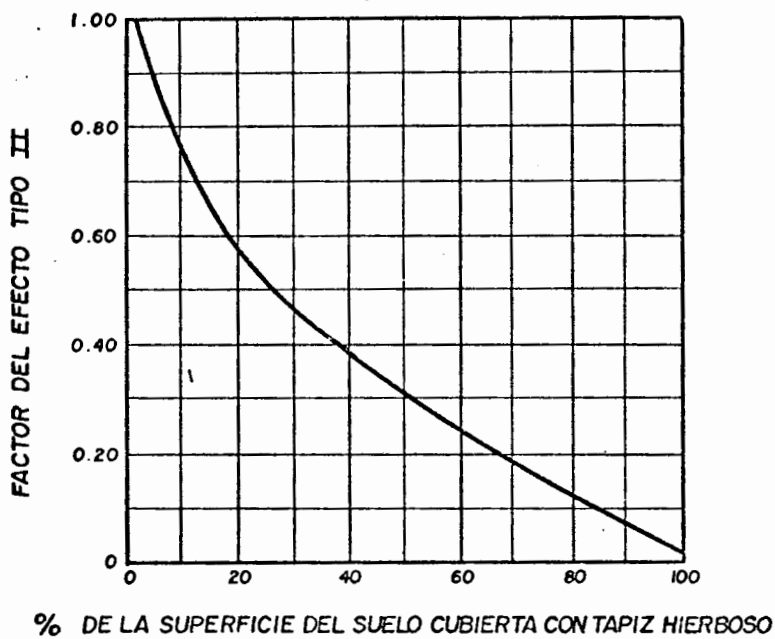


Fig. I.6

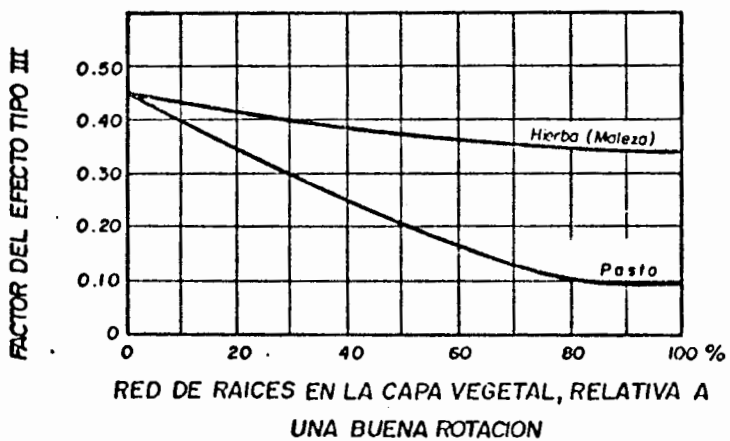


Fig. I.7

Los valores de diseño del factor P, de acuerdo a las prácticas de control utilizadas están dados en la TABLA I.6 de la página

Cuando en la cuenca o área de estudio no existen prácticas para controlar la erosión, el factor P es igual a la unidad.

El hombre sabio no debe de abstenerse de participar en el gobierno del estado, pues es un delito renunciar a ser útil a los necesitados y una cobardía ceder el paso a los indignos.

EPICTETO

## ANEXO II: RESUMEN DE LOS CRITERIOS PARA LA ESTIMACION DEL FACTOR DE EROSIVIDAD DE LA LLUVIA R, DE LA FORMULA UNIVERSAL DE PERDIDA DE SUELO.

### II.1 INTRODUCCION.

El factor de erosividad de la lluvia R, es quizás, el término de la Fórmula Universal de Pérdida de Suelo (FUPS) que más dificultades e incertidumbre presenta - su estimación. Lo anterior se refleja en la existencia de un número más o menos - importante, de criterios para su evaluación, sin que ninguno de ellos sea aceptado unánimemente, en parte debido a la heterogénea disponibilidad de datos.

La información recabada durante más de 30 años en U.S.A., permitió concluir que - el factor R a utilizar para estimar la pérdida promedio anual de suelo, debería - de incluir además de los efectos de las tormentas severas, la influencia acumulativa de muchas tormentas de moderada y baja intensidad (97,5)\*. Específicamente, el valor numérico de R debe de tomar en cuenta las consecuencias del impacto de - las gotas de lluvia, así como los efectos que dependen de la cantidad y valor máximo del escurrimiento.

Lo anterior, permite apreciar la gran dificultad que presenta la evaluación exacta del factor R, teniéndose a la fecha sólo criterios de tipo empírico que permiten obtener una estimación de tal valor.

### II.2 GENERALIDADES DE LOS CRITERIOS QUE SE PRESENTAN.

Cada criterio prácticamente utiliza diferente información, por lo común relativa a lluvias máximas, con excepción del 3er. criterio debido a J.R. Williams. Conviene indicar que los criterios serán presentados en orden DECRECIENTE de confiabilidad de sus resultados.

---

\* El primer número se indica la referencia bibliográfica y el segundo su página.

## II.3 INDICE DE EROSION DE LA LLUVIA (EI) DE W.H. WISCHMEIER Y D.D. SMITH.

### II.3.1 INTRODUCCION.

La relación encontrada entre el parámetro EI (por definir más adelante) de la tormenta y la pérdida de suelo es lineal y sus valores son directamente acumulables. En resumen, la suma de los valores EI de las tormentas ocurridas en un período dado es una medida numérica del potencial erosivo de la lluvia R en ese mismo lapso. El valor medio anual EI de un determinado sitio es el llamado: INDICE DE EROSION DE LA LLUVIA en tal localidad (97,5).

En tal índice, la energía cinética E de la tormenta da idea de los volúmenes de lluvia y escurrimiento, sin embargo, una leve tormenta de larga duración podrá tener igual valor de dicha energía E, como una tormenta muy intensa pero breve. La erosión por impacto de las gotas de lluvia se incrementa con la intensidad y por ejemplo,  $I_{30}$  (intensidad máxima en 30 minutos) será un indicador de lo prolongado del proceso de disgregación por lluvia y escurrimiento.

La energía cinética E de la tormenta es una función de la cantidad de lluvia y de todas las intensidades que componen tal aguacero. Wischmeier y Smith en 1958 encontraron la siguiente relación (103,3):

$$E = 121.3 + 89.0 \log I \quad (II.1)$$

siendo:

E = energía cinética del incremento de la tormenta, en Ton-m por hectárea y centímetro de lluvia.

I = intensidad de lluvia en el intervalo, en mm/hr.

McGregor y Mutchler, aplicaron un modelo paramétrico de optimización a una ecuación con la forma anterior y encontraron la relación siguiente (55,5):

$$E = 106.4 + 99.0 \log I \quad (II.1')$$

Tanto E como I tienen las unidades definidas para la ecuación II.1.

Por otra parte, estos autores desarrollaron en 1976 una nueva expresión para estimar la energía cinética de los incrementos de una tormenta, a partir de 315 datos (Fig. II.1 siguiente) recolectados en la zona de Holly Springs, Mississippi, U.S.A., ésta es (55,6):

$$E = 278.4 + 221.1 e^{-0.048 I} - 420.7 e^{-0.072 I} \quad (II.2)$$

Nuevamente, E, I llevan las unidades de la fórmula inicial y "e" es la base de los logaritmos naturales.

Los coeficientes de correlación de las tres fórmulas precedentes, son los siguientes: 0.794, 0.799 y 0.805, respectivamente (55,5).

### II.3.2 PROCEDIMIENTO DE APLICACION.

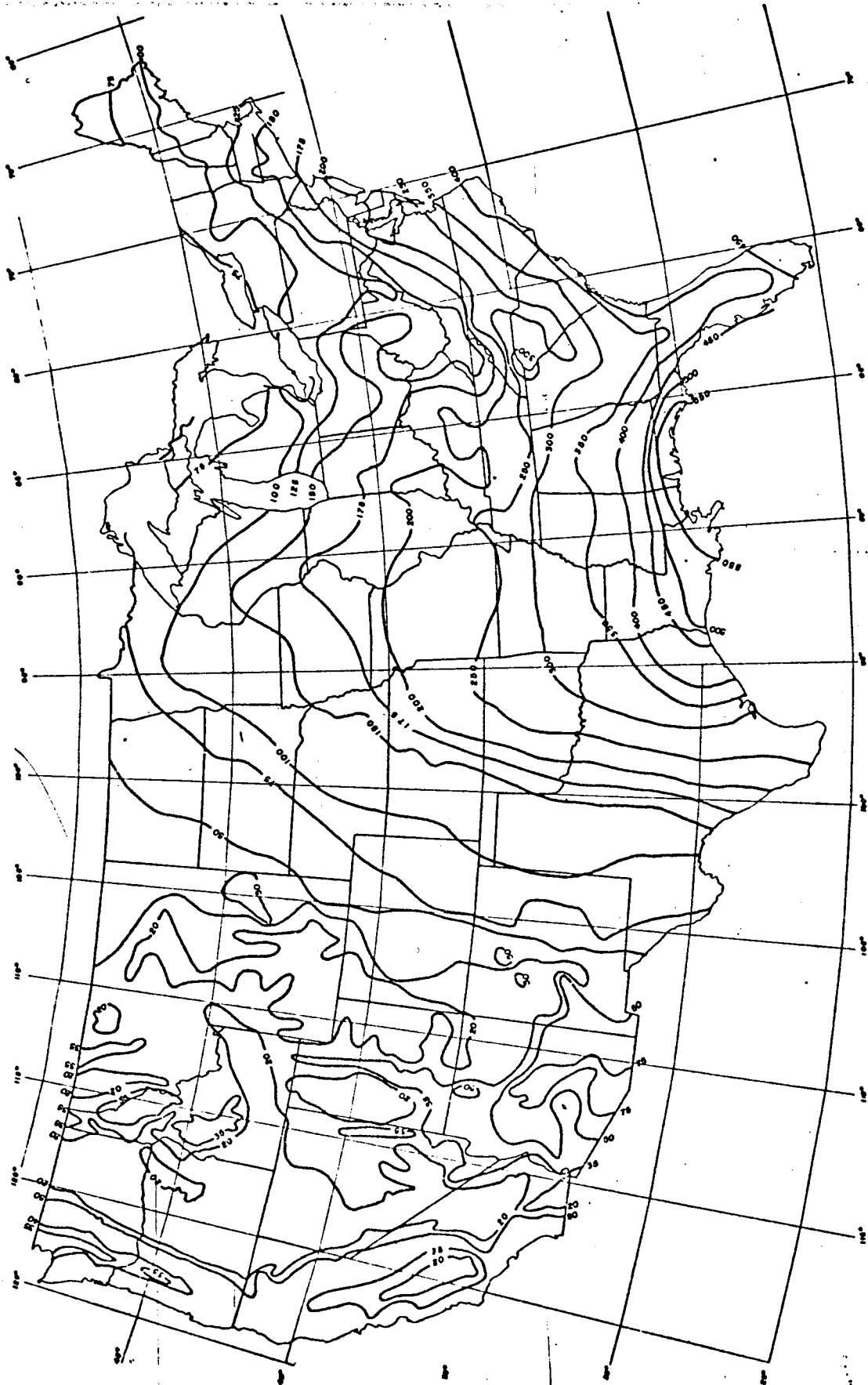
Para la aplicación de este criterio es necesario contar con registros PLUVIOGRAFICOS, y entonces, cada tormenta del período de estudio (comúnmente un año), es dividida en sucesivos incrementos de tiempo de intensidad uniforme, construyéndose una tabulación para calcular la energía cinética total de cada tormenta analizada, en la FORMA DE CALCULO No. II.1 de la página siguiente.

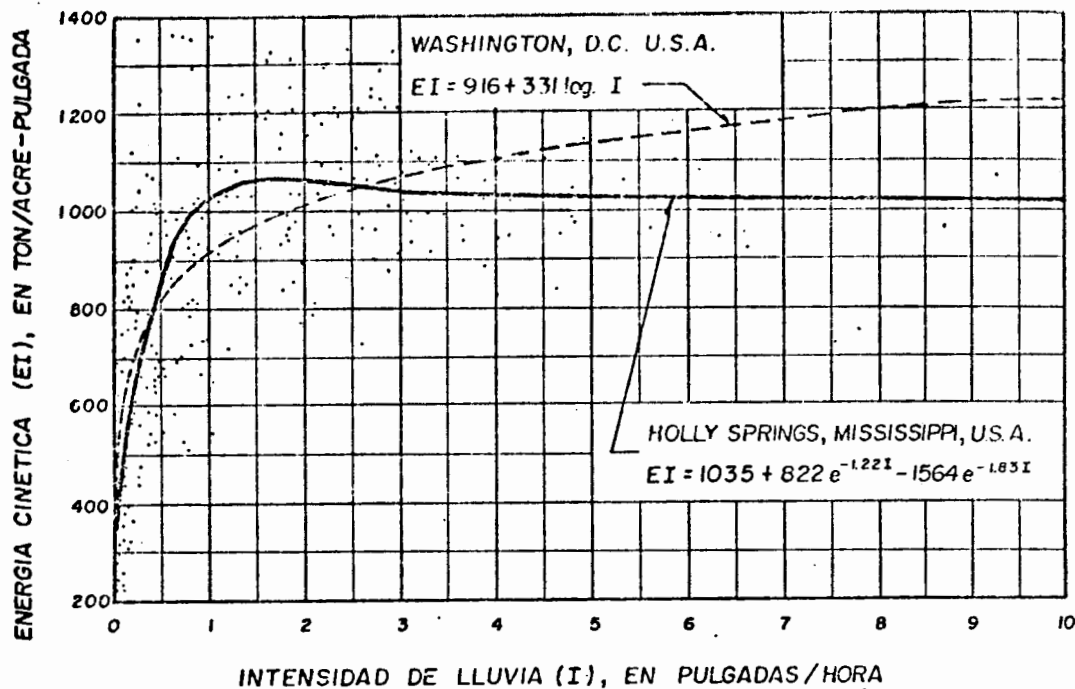
La suma de la columna 8, es decir, el valor calculado de la energía cinética E para la tormenta, se divide entre 100 y se multiplica por la intensidad máxima del aguacero en 30 minutos ( $I_{30}$ ), este valor así calculado corresponde al factor de erosividad de la lluvia R, en unidades métricas (97,56), para una tormenta.

Por último la suma de todos los valores EI calculados para cada tormenta del lapso en análisis (un año, por ejemplo), es la magnitud buscada del factor R en tal período.

FIG. II.2

FIG. II.2  
FACTOR DE EROSIVIDAD DE LA LLUVIA R SEGUN  
W. H. WISCHMEIER (1976)





FORMA DE CALCULO No. II.1

Proy. : \_\_\_\_\_ Mpio. : \_\_\_\_\_ Edo. : \_\_\_\_\_ Calculó : \_\_\_\_\_

Estación Pluviográfica : \_\_\_\_\_ Edo. : \_\_\_\_\_ Tormenta del día : \_\_\_\_\_

LECTURAS EN LA BANDA		INCREMENTOS DE LA TORMENTA			ENERGIA CINETICA (E)	
TIEMPO (hrs. y mín.)	CANTIDAD DE LLUVIA		DURACION		POR UN I (mm./hora)	PARA EL INCREMENTO (cm.)
	(mm.)	(cm.)	(mín.)	(hr.)		
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
TOTALES						E =

### II.3.3 NOTAS RELATIVAS AL PROCEDIMIENTO.

- 1a. Cuando la duración de la tormenta es menor de 30 minutos,  $I_{30}$  es igual al doble de la cantidad de lluvia ocurrida (97,51).
- 2a. Las tormentas con lluvias acumuladas menores a 12.7 mm. y separadas - de otros períodos lluviosos más de 6 horas, serán omitidas del análisis y cálculo de EI, a menos que presenten 6.35 mm. precipitados en - 15 minutos, esto equivale a una intensidad mínima de 25.4 mm/hr. (97, 5).
- 3a. El valor del factor R calculado anteriormente corresponde a unidades métricas, para adecuarlo a las unidades inglesas que es como se planteó su uso, se debe dividir entre 1.735 (97.56) y entonces, R estará en Ton-ft por acre y pulgada de lluvia.
- 4a. Cuando el escurrimiento por riego, fusión de nieve o deshielo, es significativo, un factor  $R_5$  debe ser adicionado al valor de R previamente calculado. El cálculo de este factor  $R_5$  se encuentra detallado en la referencia 97, página 7.

En U.S.A. el valor local del factor R puede ser estimado directamente a partir - del mapa de tales valores, construido por W.H. Wischmeier en 1976, Fig.II.2 siguiente (97.7).

### II.4 RELACION DE W.H. WISCHMEIER Y D.D. SMITH ENTRE EL FACTOR R Y EL PRODUCTO DE TRES LLUVIAS ESPECIFICAS.

#### II.4.1 GENERALIDADES.

Wischmeier y Smith en 1962 encontraron una relación aproximada entre el parámetro EI promedio anual y el producto de tres lluvias de diferentes duraciones y - períodos de retorno, las lluvias utilizadas fueron:

- $(P_{1hr.})_{2 \text{ años}}$  = precipitación de duración una hora y período de retorno 2 años, en milímetros.
- $(P_{24hrs.})_{2 \text{ años}}$  = precipitación de duración 24 horas y período de retorno 2 años, en milímetros.
- $(P_{ma})$  = precipitación media anual, en milímetros.

La relación encontrada por los autores en U.S.A., se tiene en la Fig.II.3 de la página siguiente (101,10), en la cual:

La RECTA A, se recomienda para climas subhúmedos y semiáridos de las planicies - del Oeste americano.

La RECTA B, es adecuada para los estados de Noroeste de U.S.A.

La RECTA C, está sugerida para el Valle del Bajo Mississippi y los estados de - la costa del Golfo de México.

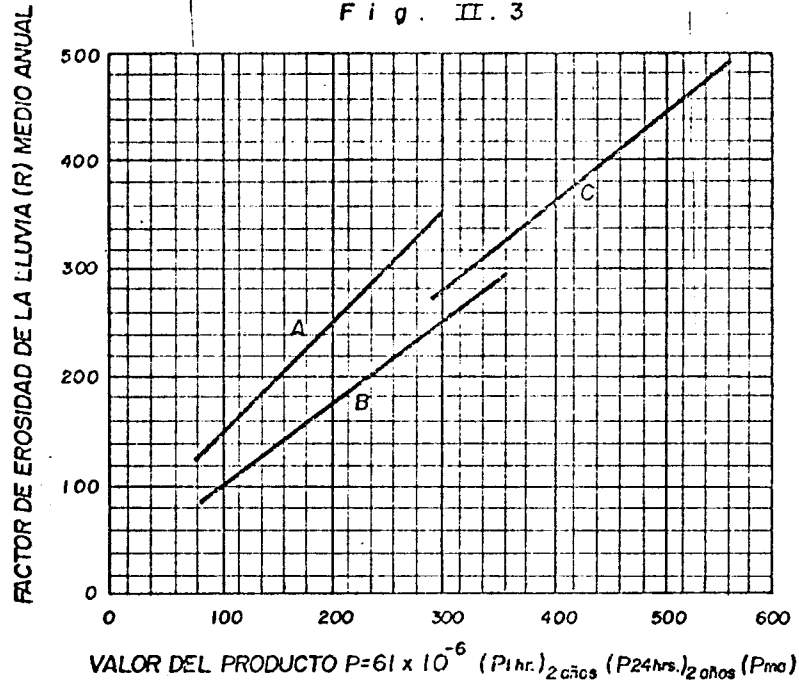
#### II.4.2 PROCEDIMIENTO DE APLICACION.

Inicialmente se estiman cada una de las tres lluvias requeridas, por medio de análisis estadístico de los registros, o bien, con un plano de líneas isomáximas -- (16,1) de los correspondientes períodos de retorno.

Se llevan los datos (valores de las tres lluvias) a la Fig.II.3 de la página siguiente, seleccionando la recta más adecuada de acuerdo al clima de la zona y se obtiene el valor buscado del factor R, en unidades del sistema inglés, es decir, Ton-ft por acre y por pulgada de lluvia.



Fig. II.3



II.5 FORMULA DE J.R. WILLIAMS PARA ESTIMAR EL FACTOR R, EN BASE A DOS CARACTERISTICAS DEL ESCURRIMIENTO.

NOTA: Este criterio ya fue expuesto en el inciso 7 del capítulo 4.

II.6 NUEVA RELACION PROPUESTA POR D.F. CAMPOS A. ENTRE EL FACTOR R Y LA LLUVIA - MAXIMA DE DURACION 6 HORAS Y PERIODO DE RETORNO 10 AÑOS.

II.6.1 GENERALIDADES.

Diversos autores han encontrado relaciones sencillas entre el factor de erosividad de la lluvia R y alguna lluvia máxima fácilmente obtenible, por ejemplo, Sánchez B. y Maza A., siguiendo con la idea anterior Campos A. encontró una excelente correlación con la lluvia de duración 6 horas y período de retorno 10 años -- ( $P_6$ ).

Para obtener la expresión matemática de la relación citada, el autor utilizó más de 40 parejas de valores de R y P, obtenidos para muy diversas localidades de U.S.A., en base a la Fig.II.2 anterior y a la figura 9-53, página 9-51 de la referencia 23.

Todo el criterio se concentra en la Fig.II.4 de la página subsecuente, donde se concluyó que la relación sería del tipo:

$$R = a (P_6)^b \tag{II.3}$$

Los valores numéricos de los coeficientes a y b se evaluaron por medio de una regresión lineal, cuyo coeficiente de correlación resultó igual a 0.974, es decir, bastante aceptable. La ecuación del criterio es:

$$R = 0.0073 (P_6)^{2.229} \tag{II.3'}$$

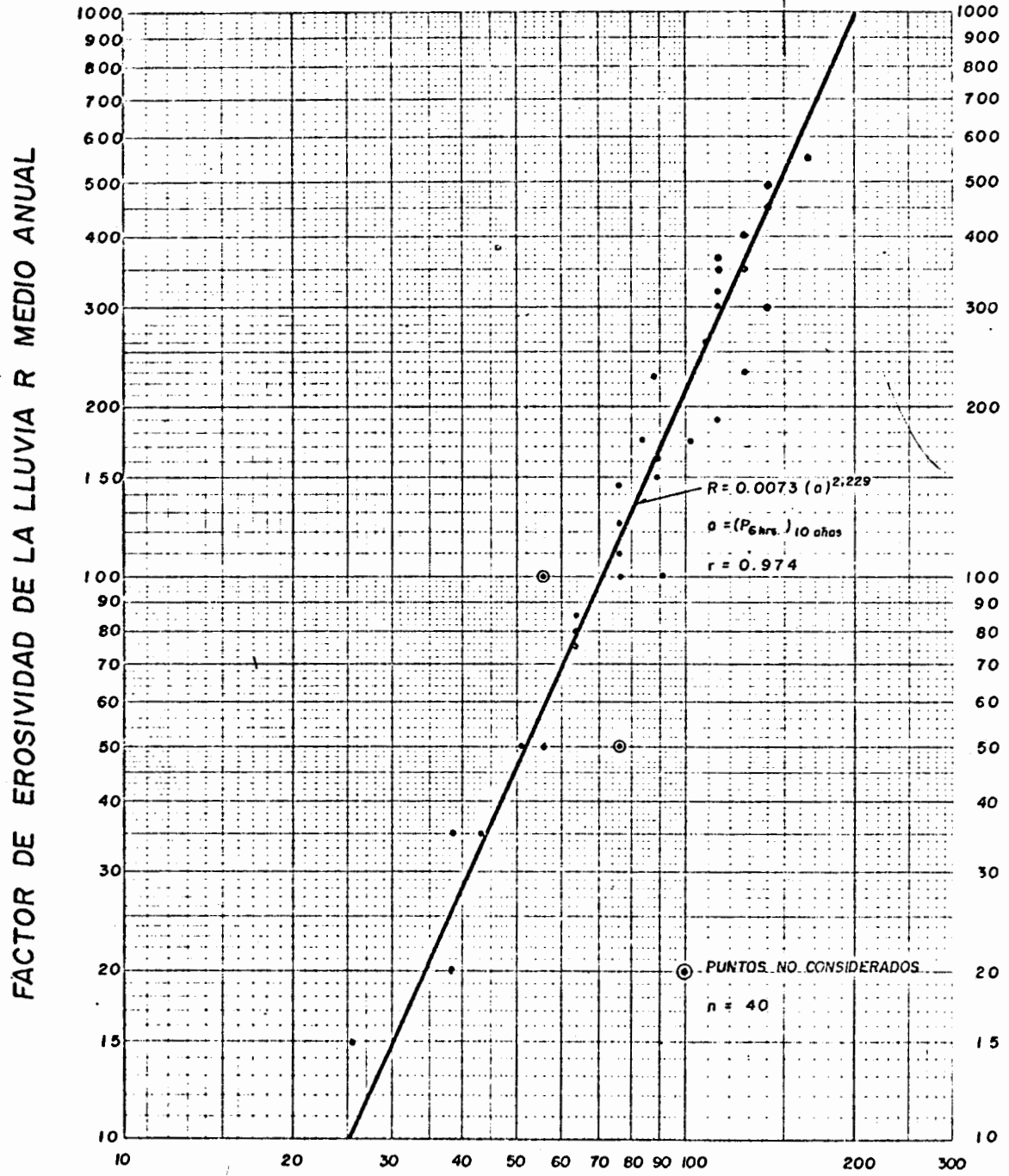
siendo:

R = factor de erosividad de la lluvia, en unidades inglesas.

$P_6$  = precipitación máxima de duración 6 horas y período de retorno 10 años, en milímetros.

II.6.2 PROCEDIMIENTO DE APLICACION.

Fig. II.4



(  $P_{6hrs.}$  ) 10 años , en mm.

Primeramente se determina la lluvia de duración 6 horas y período de retorno - 10 años, representativa de la zona o cuenca en estudio, por medio de un plano - de líneas isomáximas (16,1), o preferentemente a partir de un análisis estadís - tico de registros de lluvias máximas (10,22). Después, se lleva el valor de  $P_6$  en milímetros a la ecuación II.3 anterior y se determina el valor del factor R en el sistema inglés.

## II.7 RELACION DE J.A. MAZA A. ENTRE EL FACTOR R Y LA LLUVIA MAXIMA DE DURACION 30 MINUTOS Y PERIODO DE RETORNO 10 AÑOS.

### II.7.1 GENERALIDADES.

Uno de los primeros intentos para obtener una expresión elemental que ligara - el factor R con algún parámetro de cálculo simple, fue realizado por Maza A. y publicado en 1976 (54,4). este criterio consistió en correlacionar los valores de R obtenidos de la figura 4.1 de la referencia 3, página 41, con sus respecti - vas magnitudes de la lluvia de duración 30 minutos y período de retorno 10 -- años, tomados de la figura 5.2 de la citada referencia página 71; para diver - sos sitios de U.S.A. al ESTE del meridiano 105°.

Los resultados se concentran en la Fig.II.5 siguiente, en la cual se observó - que el valor del coeficiente de correlación fue 0.850 y su expresión matemáti - ca es:

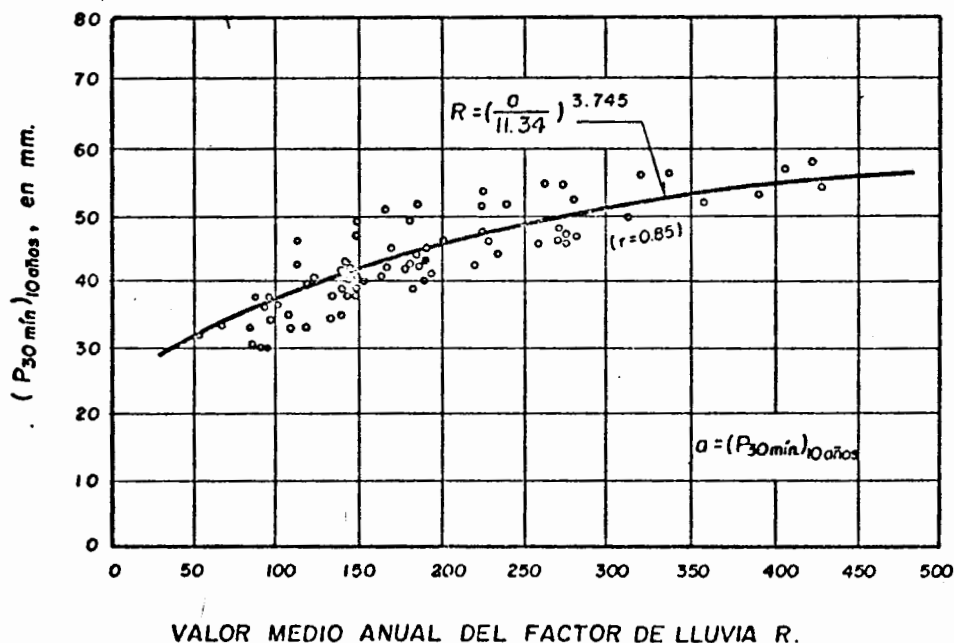
$$R = \left( \frac{P_{30}}{11.34} \right)^{3.745} \quad (II.4)$$

en donde:

R = factor de erosividad de la lluvia, en sistema inglés.

$P_{30}$  = precipitación máxima de duración 30 minutos y período de retorno 10 años, en milímetros.

Fig. II.5



### II.7.2 PROCEDIMIENTO DE APLICACION.

Ver inciso 6.2 anterior.

## II.8 RELACION DE J.L. SANCHEZ B. ENTRE EL FACTOR R Y LA LLUVIA MAXIMA DE DURACION UNA HORA.

### II.8.1 GENERALIDADES.

Definitivamente, fue Sánchez B. el primero que propuso en México una fórmula de tipo simple para estimar el valor del factor R, a partir de la lluvia máxima en una hora, registrada en la zona (74,2).

El criterio que definió el autor fue publicado en 1975, en la forma general siguiente:

$$AS = 0.000303 (P_1)^{2.50} K LS C P A \quad (II.5)$$

en la cual:

AS = aportación de sedimentos por una cuenca pequeña, en m<sup>3</sup>.

P<sub>1</sub> = precipitación máxima en una hora en la zona, en centímetros.

Esta lluvia se puede estimar en base a un plano de líneas isomáximas que Sánchez B. proporciona en la referencia 74, página 7, o bien, a través de los registros de lluvias máximas de una o varias estaciones climatológicas cercanas al sitio bajo estudio.

Conviene hacer notar que tal lluvia P<sub>1</sub>, no está asociada a un período de retorno específico.

A = área de cuenca, en m<sup>2</sup>.

Los parámetros restantes K,LS,C y P, son las otras variables de la FUPS.

Si se considera un peso específico de los sedimentos depositados (cap.5) igual a 1,100 Kgs/m<sup>2</sup>. y si se toma en cuenta el valor del factor de conversión de unidades inglesas a métricas en la FUPS, igual a 224.20 (para pasar de Ton/acre a Ton/Km<sup>2</sup>.), se tiene:

$$R = \frac{0.000303 (P_1)^{2.50}}{224.20} \frac{10^6 \text{ m}^2}{\text{Km}^2} \frac{1.10 \text{ Ton}}{\text{m}^3} (\text{m}^3./\text{m}^2.) \quad (II.6)$$

de donde se obtiene:

$$R = 1.4866 (P_1)^{2.50} \quad (II.7)$$

finalmente, con P<sub>1</sub> en milímetros y asociada esta lluvia a un período de retorno de 100 años, se obtiene una fórmula que se considera aceptable en sus pronósticos, ésta es:

$$R = 0.0047 (P_1)^{2.50} \quad (II.8)$$

Otro criterio propuesto por Sánchez B. puede ser encontrado en la referencia 75 página 7.

### II.8.2 PROCEDIMIENTO DE APLICACION.

Ver inciso 6.2 anterior.

## II.9 RELACION DE W.H. WISCHMEIER Y D.D. SMITH ENTRE EL FACTOR R Y LA LLUVIA MAXIMA DE DURACION 6 HORAS Y PERIODO DE RETORNO 2 AÑOS.

### II.9.1 GENERALIDADES.

Wischmeier y Smith indican que donde no existen registros de tormentas, pero -- puede obtenerse con cierta confiabilidad la lluvia máxima de duración 6 horas y período de retorno 2 años, tal lluvia se puede utilizar para estimar un valor del factor de erosividad de la lluvia, por medio de la ecuación siguiente (97,-57):

$$R = 0.0425 (P_6)^{2.17} \quad (II.9)$$

siendo:

R = factor de erosividad de la lluvia, en unidades inglesas.

P<sub>6</sub> = precipitación máxima en 6 horas y período de recurrencia 2 años, en milíme

tros.

Otra relación muy semejante a la anterior se puede encontrar en la referencia n, página 5.

#### II.9.2 PROCEDIMIENTO DE APLICACION.

Ver inciso 6.2 anterior.

#### II.10 RELACION ENTRE EL FACTOR R Y DOS CARACTERISTICAS DE LA TORMENTA.

##### II.10.1 GENERALIDADES.

J.C. Delwalle y otros investigadores franceses, desarrollaron en 1973 una ecuación de regresión para estimar R, a partir de la cantidad total de lluvia H - ocurrida durante la tormenta y de su intensidad máxima en 30 minutos  $I_{30}$  (s,3).

La ecuación fue definida para el Alto Volta y Niger, pero puede ser aplicable en cualquier parte del Africa Occidental, debido a esto, la fórmula se considera bastante útil para la zona del trópico húmedo de la República Mexicana, ya que existe una similitud entre estas áreas. La ecuación es:

$$R = [0.0157 H (I_{30})] - 1.18 \quad (II.10)$$

estando H en milímetros e  $I_{30}$  en mm/hr.

Por otra parte, E.J. Roose presenta una ecuación para la zona descrita anteriormente, que es afectada por lluvias del tipo monzón (s,4), ésta es:

$$R = 0.577 H - 5.766 \quad (II.11)$$

siendo R la cantidad de lluvia ocurrida en los meses de junio a septiembre.

##### II.10.2 PROCEDIMIENTO DE APLICACION.

Para la aplicación de este criterio es indispensable contar con registros pluviográficos, y poder determinar para cada tormenta ocurrida en un año, por ejemplo, su H y su  $I_{30}$ , con los cuales se estima su valor del factor R. Con la suma de todos los factores de erosividad de la lluvia R de las tormentas acontecidas, se define el valor anual buscado.

#### II.11 EVALUACION DEL FACTOR R PARA UNA CUENCA, A PARTIR DE LA LLUVIA MEDIA MENSUAL.

##### II.11.1 INTRODUCCION.

En 1977 J. Gracia S. del Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M., dirigió una investigación encaminada hacia la revisión de los criterios actuales para predecir pérdida de suelo en cuencas (26.5).

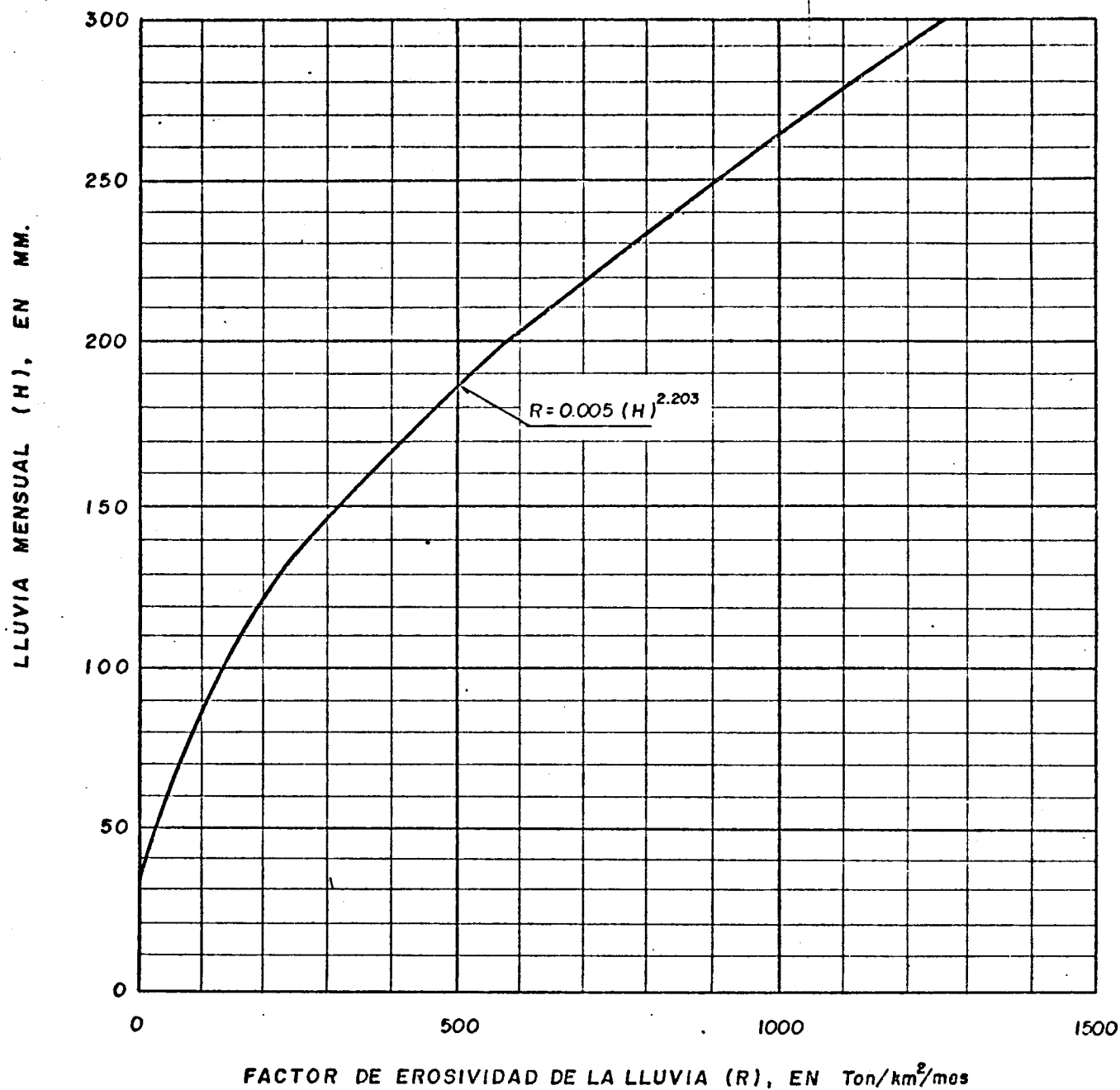
En tal estudio se utilizaron los datos hidrométricos de escurrimientos y transporte de sedimentos, de tres cuencas (menores a 1,000 Km<sup>2</sup>.), localizadas en la zona centro del país, dos de ellas en la región de unión de los estados de Guanajuato, Michoacan y Jalisco, y la otra en el Estado de México.

Tomando en cuenta que existe una relación específica entre la lluvia y el escurrimiento de una cuenca, y entre este último y la aportación de sedimentos, -- Gracia, Magallanes y Aparicio, encontraron, en base a los datos citados, que se podía relacionar el factor R y la lluvia media mensual H acaecida en la cuenca, en milímetros.

La relación anterior se muestra en la Fig.II.6 de la página siguiente, donde además se observa que la ecuación de la curva de ajuste es (50,52):

$$R = 0.0050 (H)^{2.203} \quad (II.12)$$

fórmula que presenta una enorme semejanza con las de los otros autores. Mayo--



res detalles sobre la deducción de tal ecuación se pueden encontrar en las referencias 26 y 50.

#### II.11.2 PROCEDIMIENTO DE APLICACION.

Se determina la lluvia media mensual de cada mes, o de todos aquéllos en los que la corriente transporta sedimentos, según, si se estiman aportaciones sólidas medias mensuales, o la total promedio anual. Lo anterior por medio de estaciones pluviométricas de la zona, o en base a un plano de isoyetas construido ex profeso.

Se calcula el valor de R con la fórmula II.12 y se evalúan los restantes parámetros de la FUPS para la cuenca, en especial el factor de longitud de las pendientes L se debe estimar con el criterio de los autores (inciso 5.2 del capítulo 4), así como la pendiente general de la cuenca (factor de pendiente S en la FUPS.) que debe ser calculado con el método de R.E. Horton (50,60)

#### II.12 RELACION DE W.R. EVANS Y G. KALKANIS ENTRE EL FACTOR R Y LA LLUVIA MAXI-

MA DE DURACION 6 HORAS Y PERIODO DE RETORNO 2 AÑOS.

II.12.1 INTRODUCCION.

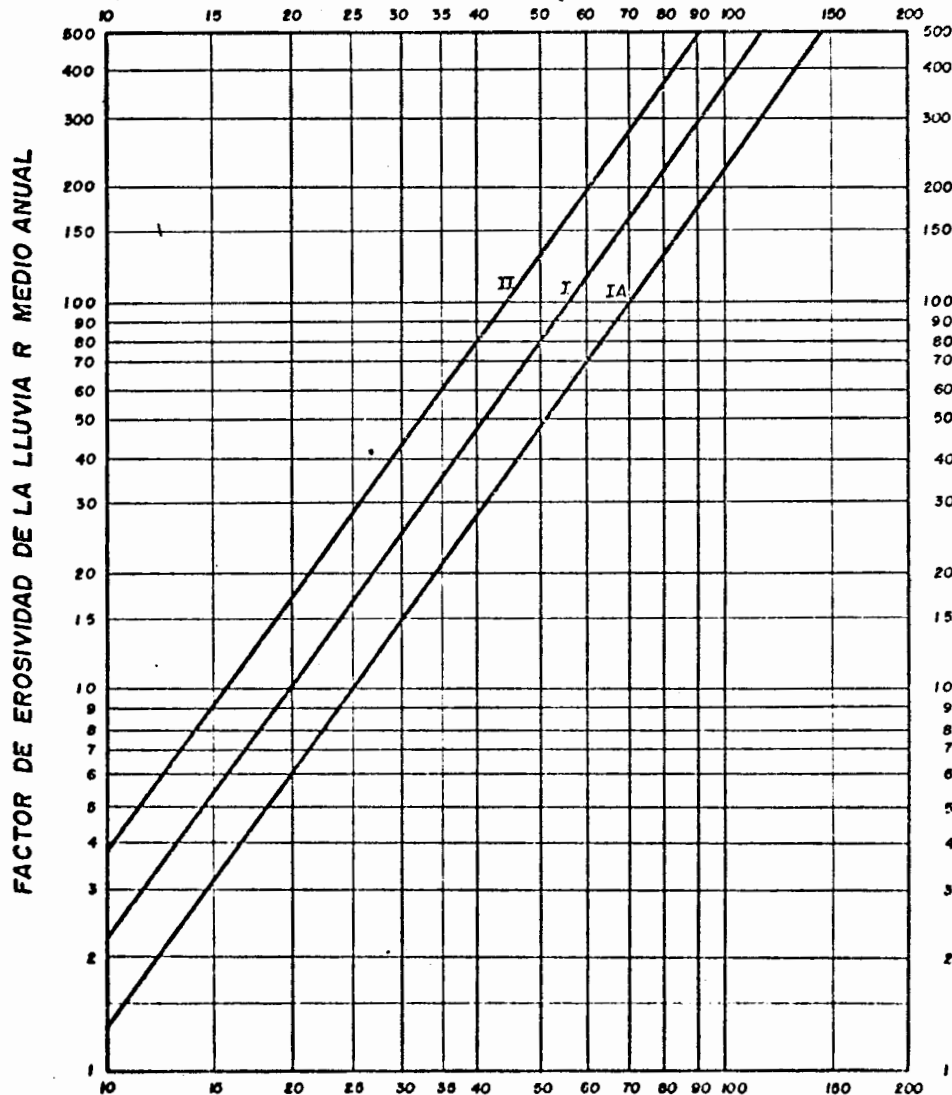
En todos los estados del Oeste de U.S.A. el escurrimiento por fusión de nieve es significativo y causa erosión laminar y en canalillos, en estos casos el factor R tiene dos componentes una debida a la lluvia y otra originada por la fusión de las nieves (18,1).

Evans y Kalkanis han desarrollado unas relaciones empíricas para el estado de California, que se muestran en la Fig.II.7 siguiente, en esta gráfica la RECTA I corresponde a la parte suroeste del estado, englobando unas condiciones medias, la RECTA IA cubre la zona noroeste, para un factor debido únicamente a las lluvias y por último, la RECTA II comprende a toda la región montañosa, es decir, la porción oriente de California, donde el factor R incluye la influencia del escurrimiento por fusión de nieve.

II.12.2 PROCEDIMIENTO DE APLICACION.

Primeramente se estima el valor de la lluvia máxima en 6 horas y período de recurrencia 2 años, en milímetros, a partir de un plano de líneas isomáximas (16, 1), o en base a un análisis estadístico de lluvias máximas (10,22). Se selecciona la recta a utilizar según las condiciones de la zona, se lleva la magnitud estimada para la lluvia a la gráfica y se encuentra así el factor R buscado, en sistema inglés.

Fig. II.7



(P6hrs.) EN MILIMETROS

## II.13 RELACIONES ENTRE EL FACTOR R Y LA LLUVIA MEDIA ANUAL.

### II.13.1 GENERALIDADES.

Para aquellos sitios en los que no se cuenta con registros pluviográficos ni pluviométricos, o cuando se requiere una estimación aproximada pero muy rápida del factor de erosividad de la lluvia R, se pueden emplear las relaciones encontradas entre R y la magnitud de la lluvia media anual (Pa), en milímetros.

Por ejemplo, Wischmeier y Smith reportan las siguientes relaciones, según la región de U.S.A. de que se trate (97,57), éstas son:

Estados de Noroeste:	R = 0.040 Pa	como límite inferior.
	R = 0.058 Pa	como límite superior.
Estados del Norte y Noreste:	R = 0.1153 Pa - 3.00	como límite inferior.
	R = 0.1500 Pa	como límite superior.
Estados del Sureste, cerca - del Golfo de México y de la costa del Atlántico:	R = 0.242 Pa	como límite inferior.
	R = 0.386 Pa	como límite superior.

Por otra parte, E.J. Roose (s, 4) indica que existe una relación entre el factor R medio anual de un período mayor a 5 a 10 años y la lluvia media anual (Pa) correspondiente a ese mismo lapso, en milímetros; en la parte occidental del Africa, ésta es:

$$R = (0.50 \pm 0.050) Pa \quad (II.13)$$

La relación anterior es válida para áreas del trópico húmedo, y no es aplicable a zonas cercanas a la montaña.



Lo que más se necesita para aprender,  
es un espíritu humilde.

CONFUCIO

### ANEXO III: RESUMEN DE LOS CRITERIOS PARA LA ESTIMACION DEL COEFICIENTE DE ENTREGA DE SEDIMENTOS (CES).

#### III.1 INTRODUCCION.

La estimación de la aportación de sedimentos de una cuenca, a partir de la erosión total que en ella tiene lugar, es tal vez el único método aplicable a la mayoría de los casos por estudiar, debido principalmente al tipo y cantidad de información requerida, pues sólo utiliza datos climáticos e información fisiográfica de la cuenca, relativa a suelos, coberturas vegetales, topografía, etc.

Esta estimación de la aportación de sedimentos es dependiente directamente de la magnitud de la erosión total y de la capacidad de transporte del material erosionado por los cauces y en general sólo una parte es llevado a la salida o punto de interés de la cuenca; pudiéndose decir que en cuencas mayores de 1.0 Km., la cantidad de sedimentos aportados SIEMPRE es menor que la pérdida de suelo estimada en sus áreas homogéneas y por lo anterior, un factor o coeficiente correctivo debe ser introducido para relacionar o ligar las dos cantidades citadas, el factor requerido es el llamado: COEFICIENTE DE ENTREGA DE SEDIMENTOS (CES) o COEFICIENTE DE APORTACION DE SEDIMENTOS (CAS). Entonces, el CES estará definido por la ecuación siguiente (88,21)\*:

$$CES = 100 (AS/ET) \quad (III.1)$$

siendo:

CES = coeficiente de entrega de sedimentos, en porcentaje.

AS = aportación de sedimentos por la cuenca en un cierto período (comúnmente un año), en Ton/Km<sup>2</sup>., o en, m<sup>3</sup>/Km<sup>2</sup>.

ET = erosión total en la cuenca en un determinado lapso (igual al de AS), en --- Ton/Km<sup>2</sup>., o bien en, m<sup>3</sup>/Km<sup>2</sup>.

\* El primer número corresponde a la referencia bibliográfica empleada y el segundo a su página consultada.

### III.2 FACTORES QUE DETERMINAN EL CES.

Muchos factores influyen en el CES y ninguno de todos ellos es constante de una cuenca a otra, debido a esto la relación entre la aportación de sedimentos y la erosión total muestra considerable variación. Estas fluctuaciones dependen de alguno o de todos los factores siguientes, aclarando que puede haber otros no identificados todavía (r,3).

**CARACTERISTICAS DE LA CUENCA:** La característica más importante de una cuenca que influye en el CES es el tamaño de ella, pues como se observa en la TABLA 4.2 del capítulo 4, las cuencas con áreas menores a 25.9 Km<sup>2</sup>., en promedio superan en más de 7 veces la producción de sedimentos de las cuencas que exceden los 2,589 Km<sup>2</sup>.-- (25,12). En realidad prácticamente todos los criterios incluyen esta particularidad, con excepción del criterio de Williams y Berndt.

Otra característica de la cuenca que determina el CES es el llamado Coeficiente de Relieve (H/L), definido por el cociente entre la diferencia de elevaciones máxima y mínima de la cuenca (H) y la longitud del cauce principal (L), definido este como la corriente de mayor desarrollo, ambos en metros o Km.

El coeficiente de relieve normalmente crece conforme el tamaño de la cuenca decrece, y debido a esto se puede comprender en parte, el porqué se tienen las más altas producciones de sedimentos en las cuencas pequeñas (81,4-1).

Varios autores han introducido este coeficiente en sus fórmulas, entre ellos S.B. Maner y J.W. Roehl.

La última particularidad de la cuenca que influye en el CES, es aquel conjunto de características relacionadas con el denominado sistema de transporte (red de cauces). Dentro de ellas se encuentran la densidad de drenaje y la pendiente del cauce principal.

**TEXTURA DEL MATERIAL EROSIONADO:** Si el material es arena o partículas más gruesas, se requiere un eficiente sistema de transporte y altas velocidades para su arrastre y en general mucho de este material es depositado inmediatamente aguas abajo cuando la velocidad decrece por cualquier causa. En cambio si el material es limo o arcilla, probablemente permanecerá en suspensión y gran parte de él será aportado a un punto lejano aguas abajo.

**MAGNITUD Y PROXIMIDAD DE LA FUENTE DE SEDIMENTOS:** Por ejemplo, si una cantidad considerable de material ha sido erosionado en un área lejana a la corriente, es probable que su CES sea menor que aquél debido a una cantidad menor de material erosionado, pero cercano a la corriente. Por otra parte, cuando la cantidad de sedimento disponible para transporte excede a la capacidad del sistema, la deposición tiene lugar y el CES empieza a decrecer (r,4).

### III.3 GRAFICAS EMPIRICAS PARA ESTIMACION DEL CES.

El uso de estas gráficas es sumamente fácil, requiriéndose únicamente las características siguientes de la cuenca: área y coeficiente de relieve.

#### III.3.1 PRIMERA GRAFICA DEL U.S.D.A., SOIL CONSERVATION SERVICE.

Esta relación empírica del CES es función del área de cuenca y es recomendada cuando el material erosionado es de textura fina a media y está dada en la Fig.III.1\*-- (81,4-1).

#### III.3.2 SEGUNDA GRAFICA DEL U.S.D.A., SOIL CONSERVATION SERVICE.

Esta relación empírica del CES también es función del tamaño de cuenca y es recomendada cuando la mayoría del material erosionado tiene textura media a gruesa y se tiene en la Fig.III.2 (81,4-4).

#### III.3.3 TERCERA GRAFICA DEL U.S.D.A., SOIL CONSERVATION SERVICE.

\* Las figuras son presentadas al final del texto.

Esta gráfica también es una relación empírica para el CES, pero es ahora dependiente del coeficiente de relieve (H/L) y está recomendada cuando la mayor parte del material erosionado tiene textura media a gruesa, está en la Fig.III.3 (81,4-5).

#### III.3.4 PRIMERA GRAFICA DE S.B. MANER.

Maner utilizó en 1958, 25 registros del CES en diversas cuencas de la zona de Red Hills, la cual abarca parte de los estados de Texas, Oklahoma y Kansas, U.S.A.; el autor analizó los factores que afectaban la magnitud de tal coeficiente de su estudio concluyó una ecuación (51,5) cuyo coeficiente de correlación fue 0.987, ésta es:

$$\log \text{CES} = 2.94259 - 0.82363 \log (H/L) \quad (\text{III.2})$$

siendo:

CES = coeficiente de entrega de sedimentos, en porcentaje de la erosión total anual.

H/L = coeficiente de relieve, adimensional.

La ecuación anterior se tiene desarrollada en forma de gráfica en la Fig.III.4

#### III.3.5 SEGUNDA GRAFICA DE S.B. MANER.

Maner en 1962, empleó 14 datos de la zona de Blackland Praire, Texas, U.S.A. y analizó la correlación del CES con varios factores como el área de cuenca, la densidad de drenaje, la longitud del cauce principal y el coeficiente de relieve (52,6), encontrando que el mayor coeficiente de correlación se obtuvo con el tamaño de la cuenca y fue 0.960. La fórmula del autor fue (52,4):

$$\log \text{CES} = 1.93542 - 0.14191 \log 10 A \quad (\text{III.3})$$

donde:

CES = coeficiente de entrega de sedimentos, en porcentaje de la erosión total anual

A = área de cuenca, en Km<sup>2</sup>.

Esta fórmula se presenta en forma de gráfica en la Fig.III.5

#### III.3.6 GRAFICA PROPUESTA POR EL COMMITTEE ON SEDIMENTATION OF THE HYDRAULICS DIVISION, A.S.C.E.

El Task Committee on Preparation of Sedimentation Manual of A.S.C.E., ha condesado en una sola curva promedio todos los valores encontrados en cinco zonas de U.S.A., con los cuales fueron construídas cada una de las curvas del CES en tales áreas -- (88,22). Esta curva promedio para el CES se tiene en la Fig.III.6

#### III.4 OTRAS FORMULAS EMPIRICAS PARA ESTIMAR EL CES.

Dentro de este grupo están tres criterios que no han sido presentados en forma de gráfica y que toman en cuenta diversos factores.

III.4.1 FORMULA DEDUCIDA EN LA CUENCA DE MULE CREEK, U.S.A. EN EL SUROESTE DE IOWA  
El la referencia 68, página 3, se reproduce una figura presentada originalmente -- por C.E. Beer en la cual se tienen dos fórmulas, una de ellas deducida en la cuenca de Mule Creek, ésta es:

$$\text{CES} = 74.389 A^{-0.258} \quad (\text{III.4})$$

estando A en Km<sup>2</sup>. y CES en porcentaje.

#### III.4.2 FORMULA DE L.M. GLYMPH.

La otra fórmula reportada en la figura descrita en el inciso anterior, es aquella debida a Glymph, la cual es:

$$\text{CES} = 34.946 A^{-0.239} \quad (\text{III.5})$$

A y CES tienen las mismas unidades de la ecuación precedente.

#### III.4.3 FORMULA DE J.R. WILLIAMS Y H.D. BERNDT.

Williams y Berndt en 1972, procesaron los datos de cinco cuencas pequeñas (<17.7 -

Km<sup>2</sup>.) en la zona de Blacklands Texas, U.S.A. y encontraron la siguiente expresión (99,8):

$$CES = 62.7 (S_c)^{0.403} \quad (III.6)$$

en donde:

CES = coeficiente de entrega de sedimentos, en porcentaje.

S<sub>c</sub> = pendiente promedio del cauce principal, en porcentaje y calculada con la fórmula de Taylor y Schwarz (10,95), ésta es:

$$S_c = 100 \left[ \frac{m}{1/\sqrt{s_1} + 1/\sqrt{s_2} + 1/\sqrt{s_3} + \dots + 1/\sqrt{s_m}} \right]^2 \quad (III.7)$$

en la cual:

m = número de tramos de igual longitud (l) en que se divide el perfil del cauce principal, en metros.

s<sub>i</sub> = pendiente de cada uno de los tramos en que se dividió el colector principal, evaluada como:

$$s_i = h_i/l \quad (III.8)$$

siendo h<sub>i</sub> el desnivel en cada tramo, en metros y l, su longitud también en metros.

#### III.4.4 FORMULA DE J.N. ROEHL.

Roehl en 1962 encontró que el CES en muchas cuencas del sureste de U.S.A., es una función de su tamaño (A), en Km<sup>2</sup>., de su coeficiente de relieve (H/L), adimensional y del parámetro que denominó Relación de Bifurcación Media Ponderada (B), la cual la definió como el promedio pesado de los cocientes entre el no. de corrientes de cualquier orden (n) y el no. de cauces de orden superior (n+1). La ecuación de Roehl es la siguiente (78,14):

$$\log CES = 4.365 - 0.23 \log A - 0.51 \text{ colog } (H/L) - 2.80 \log B \quad (III.9)$$

A título orientativo se cita a continuación el rango de valores que Roehl encontró para el parámetro B, en 15 cuencas de la zona de Piedmont, U.S.A.: rango de variación de 3.28 a 4.92, con un valor muy estable del orden de 4.40 (88,21).

#### III.5 TABLA DE VALORES EMPIRICOS PARA ESTIMAR EL CES.

J.N. Roehl propuso en 1962, unos valores del CES concentrados en la TABLA III.1 siguiente y una fórmula para interpolación, con estas dos herramientas se puede efectuar una estimación rápida de tal coeficiente en función del área de cuenca únicamente (A, en Km<sup>2</sup>.), éstas son (63,6):

TABLA III.1

A*, en Km <sup>2</sup> .	CES*, en %
0.026	65.0
0.259	44.0
2.589	29.0
25.889	18.0
258.888	9.5
1,553.329	5.0

Fórmula para interpolación:

$$CES = CES^* (A^*/A)^{0.20} \quad (III.10)$$

donde:

CES = coeficiente de entrega de sedimentos buscado, en porcentaje.

CES\* = valor base del CES, en porcentaje. Tomado de la TABLA III.1 anterior.

A = tamaño de la cuenca bajo estudio, en Km<sup>2</sup>.

A\* = área de cuenca correspondiente al valor base CES\* en la TABLA III.1, en Km<sup>2</sup>.

Fig. III.1

# CURVA DEL COEFICIENTE DE ENTREGA DE SEDIMENTOS, PARA SUELOS DE TEXTURA FINA

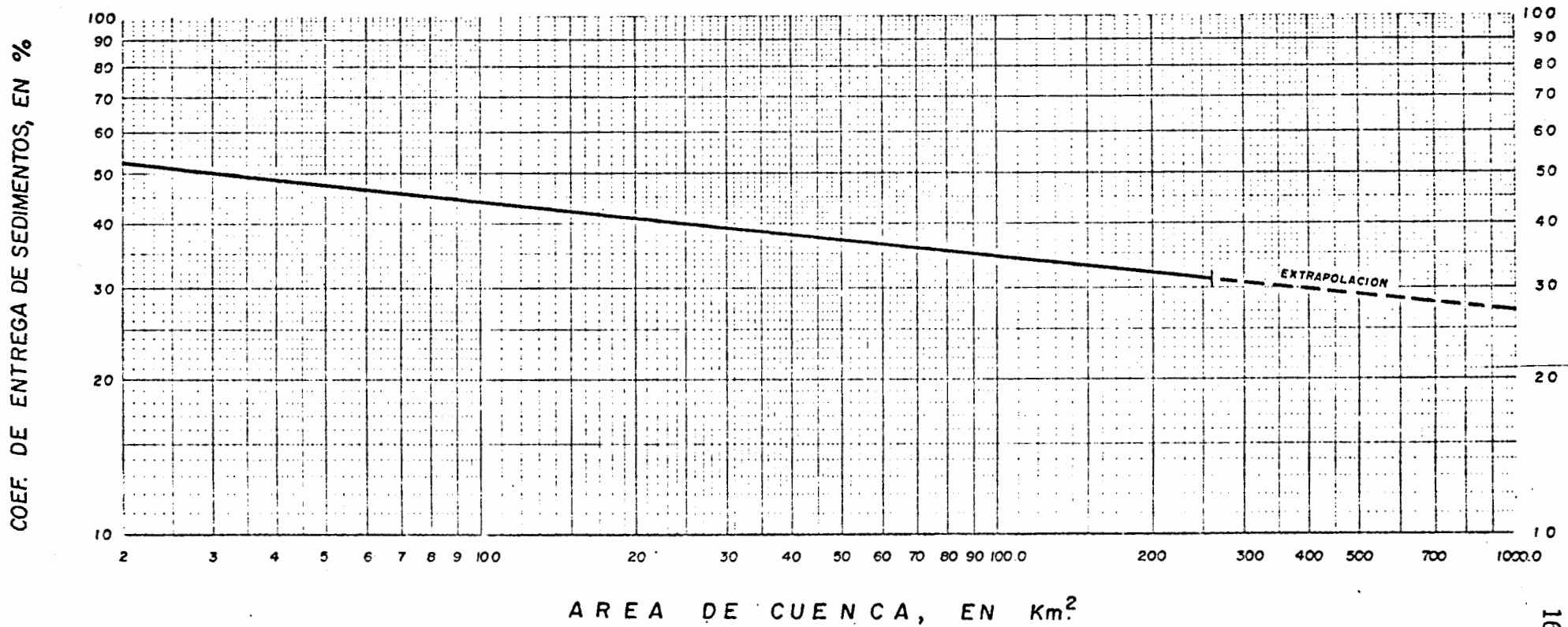


Fig. III.2

CURVA DEL COEFICIENTE DE ENTREGA DE SEDIMENTOS, PARA  
SUELOS DE TEXTURA GRUESA

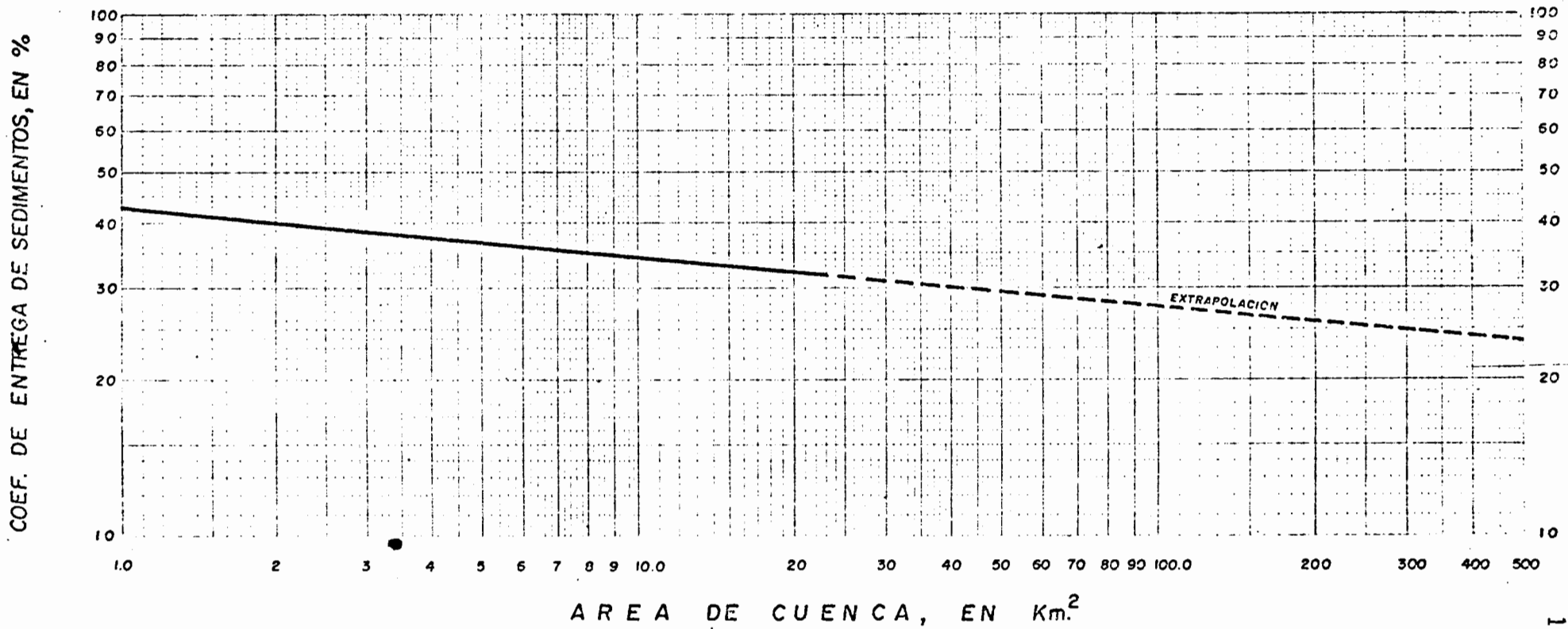


Fig. III.3

RELACION (H/L) 10<sup>-2</sup>

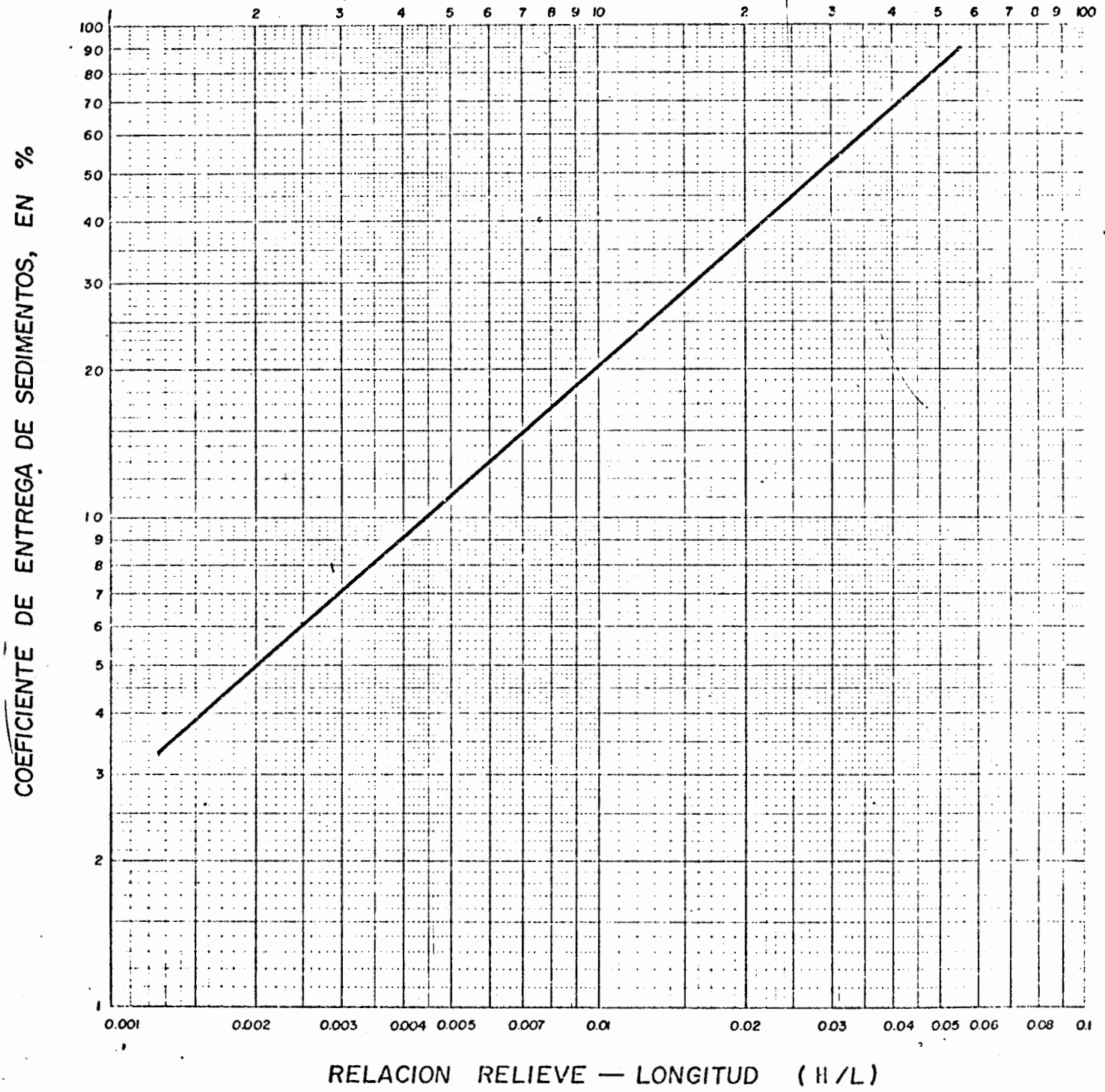




Fig. III. 4

COEF. DE ENTREGA DE SEDIMENTOS EN LA ZONA DE RED HILLS, U.S.A.

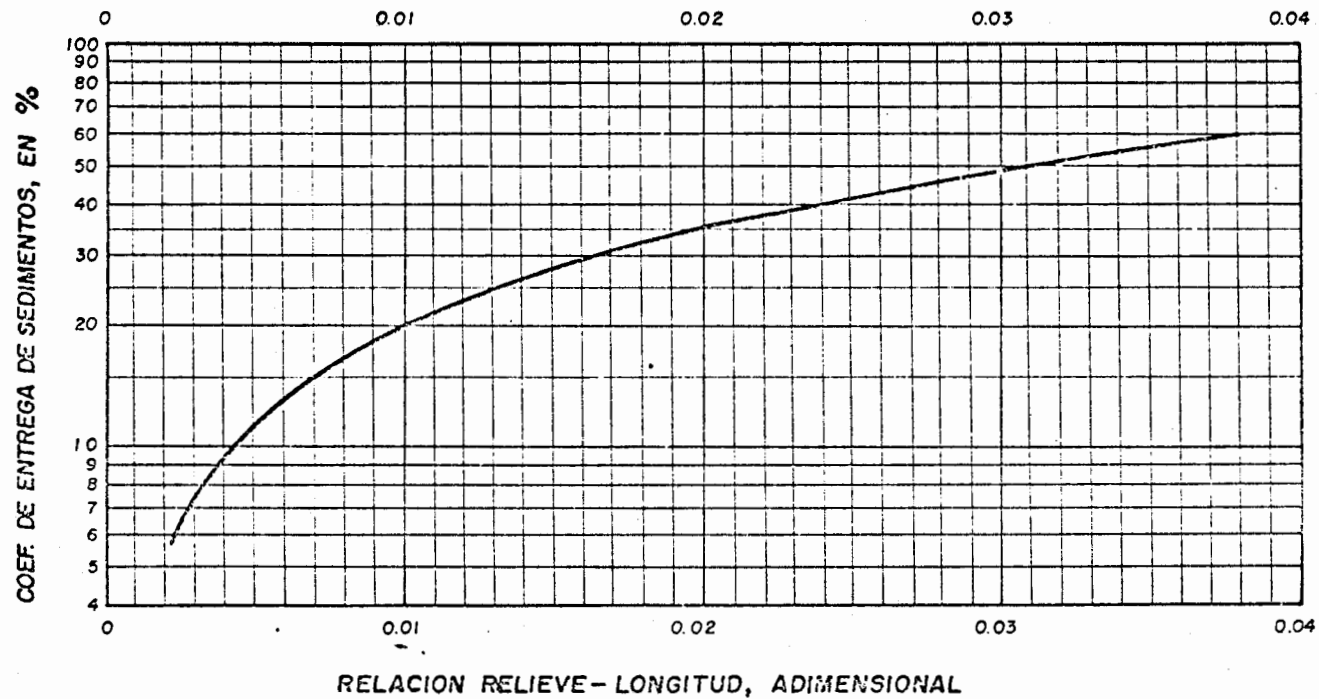


Fig. III. 4

Fig. III.5

CURVA DE COEFICIENTES DE ENTREGA DE SEDIMENTOS EN EL AREA DE  
BLACKLAND PRAIRIE LAND, U. S. A.

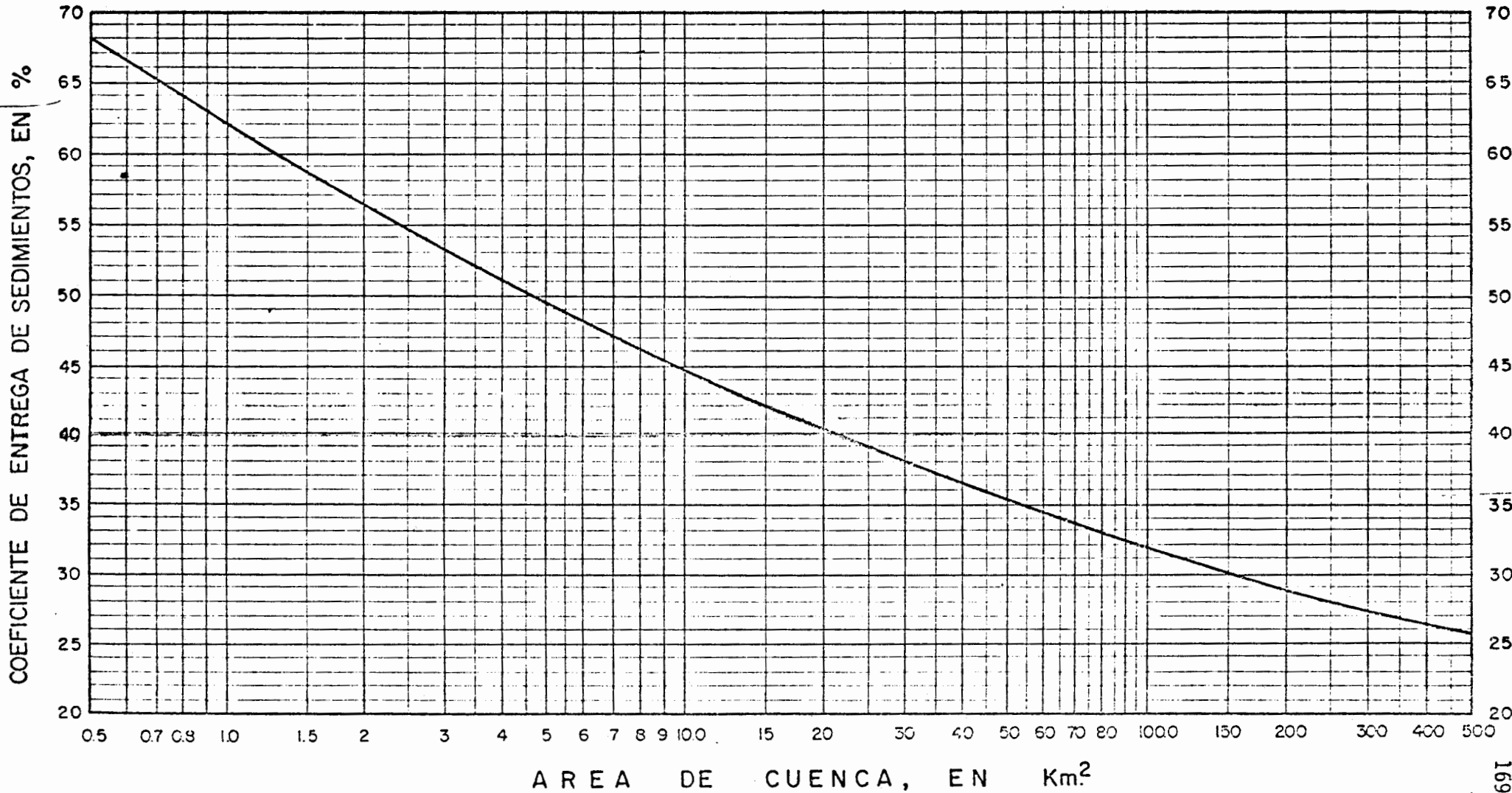


Fig. III.6

# CURVA PROMEDIO DEL COEFICIENTE DE ENTREGA DE SEDIMENTOS, EN LAS AREAS SIGUIENTES :

*Red Hills Physiographic Area - Texas and Oklahoma*

*Missouri Basin Loess Hills - Iowa and Nebraska*

*Blacklan Prairies - Texas*

*San - Clay Hills - Mississippi*

*Piedmont Physiographic Area - North Carolina, South Carolina and Georgia*

SEGUN COMMITTEE ON SEDIMENTATION OF THE HYDRAULICS DIVISION, ASCE .

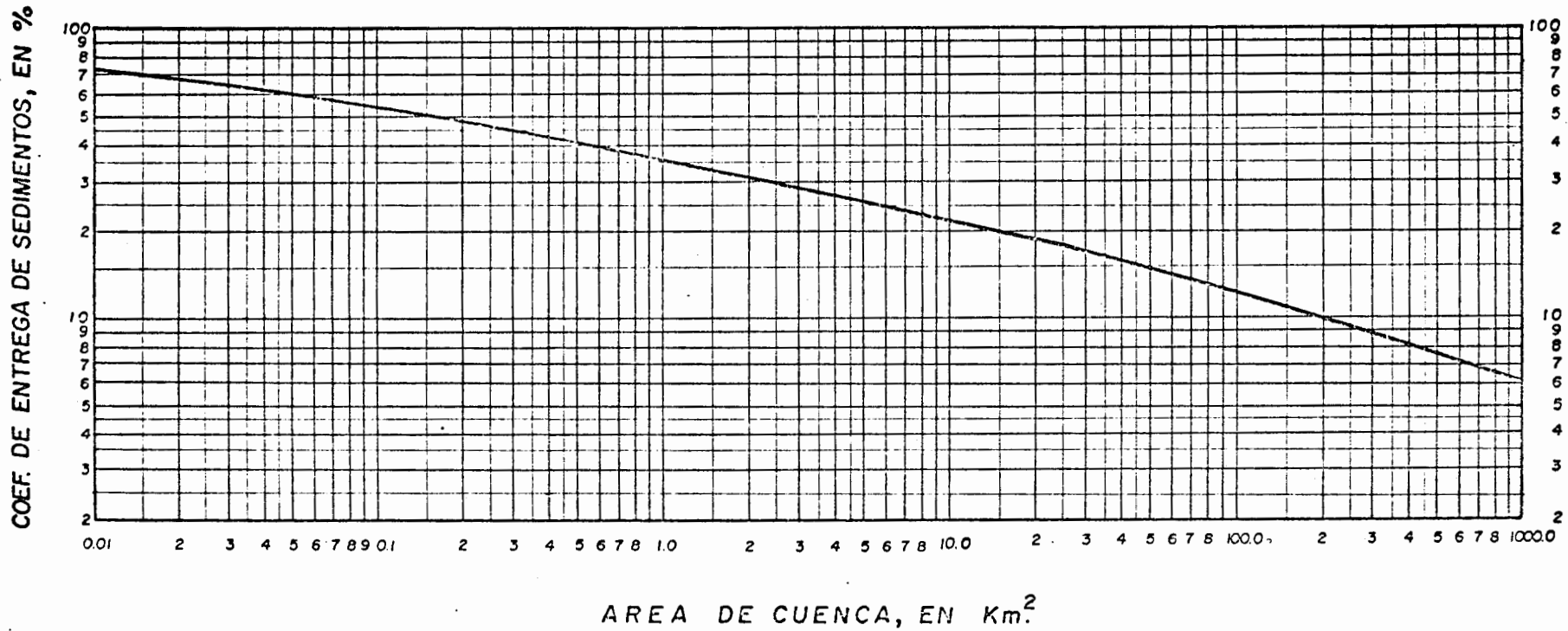


Fig. III. 6

A los veinte años, reina la voluntad;  
 a los treinta, el ingenio,  
 y a los cuarenta, el juicio.

BENJAMIN FRANKLIN

#### ANEXO IV: GLOSARIO DE TERMINOS.

• **ABRACION** (abrasion): Acto o proceso de desgaste por fricción, o sus efectos resultantes, con movimiento de restos, debido a un curso de agua, al mar, hielo o viento (62,1)\*.

**ACARREO O ARRASTRE DE FONDO** (bed load): Arena, lodos gravilla y detritus de rocas - principalmente no en suspensión, que un curso de agua arrastra por el fondo de su lecho (62,18).

**ACORAZAMIENTO DEL CAUCE** (armoring of channel): Formación de una capa resistente de partículas grandes en el fondo del cauce, como resultado de la remoción de las partículas finas por erosión.

**ALMACENAMIENTO o CAPACIDAD PARA SEDIMENTOS** (sediment pool): Espacio de un embalse - destinado a la acumulación de sedimentos sumergidos, durante la vida de la estructura (83,45).

**ALUVIAL** (alluvial): Perteneciente al material que es transportado y depositado por un cauce (83,6).

**ALUVIACION** (aggradation): Elevación de una superficie, por deposición de sedimentos (62,4).

**APORTACION DE SEDIMENTOS** (sediment yield): Cantidad total de sedimentos efluentes - de una cuenca en un cierto lapso. Incluye el acarreo de fondo y la carga o transporte de sedimentos en suspensión.

**AREA DE DRENAJE** (drainage basin): Extensión de superficie que tiene una salida única para su escurrimiento superficial (62,64).

\* El primer número se refiere a la referencia bibliográfica empleada y el segundo a su página consultada.

- BARRANCO (coulee):** Corrientemente, cualquier arroyo seco, o cauce de corriente intermitente de considerable tamaño (62,43).
- BIFURCACION (bifurcation):** División de una corriente en dos o más ramales (62,19).
- CAÑON (canyon):** Valle profundo, con laderas altas y escarpadas, frecuentemente cruzado por corrientes de agua (62,23).
- CAPA DE HUMUS (litter):** Capa superior de los residuos orgánicos, compuesta de materia orgánica recientemente aportada o ligeramente descompuesta (62,149).
- CAPA DURA (hardpan):** Capa densa del subsuelo que impide la penetración de las raíces y del agua (62,111).
- CAPACIDAD DE ARRASTRE DE SEDIMENTOS (load-carrying capacity):** Cantidad máxima de sedimentos que pueden ser arrastrados por un cauce (62,24).
- CAPACIDAD UTIL DEL EMBALSE (storage capacity):** Volumen de agua en un embalse, entre los niveles mínimo y máximo, en condiciones normales de funcionamiento (62,239).
- CARGA DE SEDIMENTOS EN SUSPENSION (suspended sediment load):** Sedimentos que permanecen en suspensión en las aguas durante un período de tiempo considerable sin sedimentarse (62,211).
- CAUCE (channel):** Parte más profunda de un río o curso de agua, por la que fluye el caudal o gasto principal (62,29).
- CAUCE ESTABLE (stable channel):** Cauce en el que la sedimentación y la erosión, se equilibran en valor medio (62,31).
- CAUCE HERBOSO (grassed waterway):** Canal o cauce, usualmente ancho y poco profundo, cubierto con pasto resistente a la erosión y utilizado para evacuar aguas superficiales de los terrenos de cultivo (83,25).
- CAUDAL O GASTO DE SEDIMENTOS (sediment discharge):** Cantidad de sedimentos transportados en un período dado y en una sección del río, expresado en peso o en unidades de volumen (61,201).
- CLASIFICACION DE SEDIMENTOS (sediment grading):** Clasificación de los sedimentos de los ríos, de acuerdo con el tamaño de las partículas (62,210).
- CLASIFICACION DE SUELOS (soil classification):** Arreglo sistemático de los suelos -- dentro de grupos o categorías en base a sus características. Se han formado grandes grupos en base a características generales y las subdivisiones se han efectuado en base a diferencias de propiedades más específicas (83,47).
- COBERTURA (cover):** Vegetación u otro material que provee protección al terreno (83,16).
- COEFICIENTE DE ENTREGA DE SEDIMENTOS (sediment delivery ratio):** Cociente entre la aportación de sedimentos y la llamada erosión total, en porcentaje. Ambos términos son expresados en unidades de peso.
- CONO DE DEYECCION o ABANICO ALUVIAL (debris cone or alluvial fan):** Depósito aluvial en un curso de agua cuando sale de un cañón a una llanura (62,5).
- CONSERVACION DE SUELOS (soil conservation):** Preservación del suelo contra deterioro y pérdida, mediante su uso conforme a sus capacidades y aplicando las prácticas de

conservación que exigen su protección y mejoramiento (21,393).

**CONSOLIDACION** (consolidation): Asentamiento de un suelo (o sedimento) producido por una carga, incrementada o continua, que produce una disminución del volumen de poros (62,38).

**CORRIENTE DE DENSIDAD** (density current): Corrientes en el mar, en estuarios o en lagos y embalses, causadas por variación de la densidad del agua o de la concentración de sedimentos en suspensión (62,50).

Flujo por gravedad de un fluido sobre, bajo o a través de otro fluido de densidad ligeramente menor, tal como el flujo de agua turbia bajo el agua clara en un embalse o lago (61,64).

**CORRIENTE DE FANGO** (mud flow): Flujo de agua en el que, por estar fuertemente cargado de tierra y residuos, la masa fluyente es espesa y viscosa (62,90).

**CORRIENTE DE FONDO** (bottom current): Movimiento del agua cargada de sedimentos a lo largo del fondo de los embalses (62,20).

**CUBIERTA VEGETAL DEL SUELO** (canopy): Cualquier vegetación que forma una capa protectora en la superficie del suelo, o precisamente encima de esa superficie (21,394).

**CULTIVO DE CUBIERTA** (crop cover): Cultivo de crecimiento denso y que se siembra con preferencia para protección y mejoramiento del suelo, entre los períodos de producción de cosecha normal, o bien entre árboles frutales (21,395).

**CULTIVO EN FAJAS** (crop band): Cultivo que se siembra en una distribución sistemática en fajas o bandas, para que sirvan de barrera contra la erosión del agua y del viento (21,395).

**CULTIVO EN CONTORNO** (contour crop): Llevar a efecto labores agrícolas, tales como: arado, siembra, escarda y recolección, siguiendo las curvas de nivel o en ángulo recto con la dirección natural de la pendiente del terreno (21,395).

**DEFORESTACION** (deforestation): Destrucción de bosques (62,49).

**DEGRADACION** (degradation): Desintegración y desgaste de la superficie de las rocas, suelos, estratos, etc., por la acción de la atmósfera o del agua (62,49).

**DELTA** (delta): Depósito aluvial en la desembocadura de un río y el conjunto geográfico y geomorfológico por el originado (62,50).

Un tipo de depósito de los ríos, de forma aproximadamente semicircular y formado donde el río pierde su capacidad de transporte debido a que su flujo entra a un cuerpo de aguas quietas, como el mar, un lago o un embalse (61,63).

**DENSIDAD DE DRENAJE** (drainage density): Suma de las longitudes de todos los cauces de cualquier orden, en un área de drenaje, dividida por tal área (62, 64).

**DEPOSITO PARA SEDIMENTOS** (silt tank): Pequeño estanque artificial, localizado aguas arriba de una finca o de otro embalse, para retardar la velocidad de las aguas e inducir la sedimentación de los materiales que transporta (61,208).

**DISGREGACION** (detachment): Remoción de los fragmentos transportables de suelo por cualquier agente erosivo, usualmente las gotas de lluvia, el escurrimiento o el viento (83,18).

**DISTRIBUCION DE PROBABILIDAD** (probability distribution): Distribución de frecuencia,

dividida por el número total de casos, suponiendo que este último tienda a infinito (62,181).

ECOSONDA (echo sounder): Instrumento por medio del cual se determina la profundidad del agua midiendo el tiempo necesario para que una señal acústica llegue y --vuelva desde el fondo (62,69).

EFICIENCIA DE RETENCION (trap efficiency): Capacidad de un embalse para retener o atrapar sedimentos (83,57).

EMBALSE (reservoir): Masa de agua, natural o artificialmente almacenada que regula y controla los caudales (62,197).

ENCALAR (whitewash): Aplicación de cal a la tierra, principalmente para disminuir la acidez del suelo y darle calcio para el crecimiento vegetal. Puede también mejorar la estructura del suelo, su contenido de materia orgánica y el de nitrógeno, al aumentar el crecimiento de las leguminosas y los microorganismos del suelo (21,396).

EROSION (erosion): Desgaste del suelo por agua en movimiento, glaciares, vientos y olas (62,73).

EROSIONABLE (erodible): Suceptible a la erosión (83,21).

EROSION ACELERADA (accelerated erosion): Erosión mucho más rápida que la normal, natural o erosión geológica, principalmente como un resultado de las actividades del hombre o, en algunos casos, de otros animales o catástrofes naturales, por --ejemplo, incendios (83,21).

EROSION NORMAL o GEOLOGICA (geological erosion): Erosión normal o natural causada por el proceso geológico actuando a lo largo de grandes períodos de tiempo y resultando en un desgaste de las montañas, planicies de inundación, costas, etc. (-83,21).

EROSION EN CARCAVAS (gully erosion): Proceso de erosión por medio del cual la acumulación del agua en canales estrechos y durante cortos tiempos, remueve el suelo en esta área con considerable profundidad, variando desde 1 a 2 pies y como máximo 75 a 100 pies.

EROSION EN SURCOS Y EROSION LAMINAR (rill and sheet erosion): Erosión laminar es la eliminación de una capa del suelo bastante uniforme, o de materiales de la superficie de la tierra, mediante un flujo superficial. Cuando el flujo superficial se concentra en microcanales, la erosión laminar se --transforma en erosión de surco (62,201).

EROSION TOTAL (gross erosion): Es el total de todas las erosiones laminares, en --surcos, en cárcavas y en los cauces, de una cuenca, usualmente expresada en masa (toneladas) pero algunas veces reportada volumetricamente.

EROSIVO (erosive): Que tiende a causar erosión; la expresión se aplica al agente erosionante, tal como el viento o el agua (21,397).

ESTABILIZACION DE CAUCES (channel stabilization): Prevención de la erosión y esta --bilización de la distribución de velocidad en un canal usando caídas, revestimientos, vegetación y otras medidas (83,12).

ESTRUCTURA DEL SUELO (soil structure): El acomodo o agrupación de las partículas



primarias del suelo en agregados, los cuales pueden ser gruesos, medios o finos. La estructura del suelo afecta a la absorción y al movimiento del agua en el interior del suelo (61,215).

**EUTROFIZACION (eutrophication):** Proceso por el cual las aguas se eutrofizan (más ricas en sustancias nutritivas que se requieren para el crecimiento de plantas -- acuáticas, como las algas) sea en forma natural como consecuencia del envejecimiento de una masa de agua o artificialmente por efecto de fertilización y contaminación (62,74).

**EXPLOTACION DE CUENCAS (watershed management):** Utilización planificada de cuencas hidrográficas, de acuerdo con objetivos predeterminados (62,281).

**FERTILIZANTE (fertilizer):** Cualquier material orgánico o inorgánico de origen natural o sintético, que se adiciona al suelo para abastecer de los elementos esenciales para el desarrollo de las plantas (83,23).

**FOTOGRAFIA AEREA (aerial photograph):** Una fotografía de la superficie terrestre - tomada con equipo aerotransportado, algunas veces llamada aereofoto (83,5).

**GABIONES (gabions):** Una jaula de malla de alambre rectangular o cilíndrica llena de piedras y usada como protección, revestimiento, etc. contra la erosión (83, 25).

**PASTIZAL (grazing):** Tierra destinada al apacentamiento, ocupada por vegetales para pasto permanente, o por plantas anuales que se siembran por si solas y que se conserva así sin ararla durante varios años (21,402).

**PERIODO DE RETORNO (return period):** Intervalo medio de tiempo o número de años al cabo de los cuales se igualará o superará un suceso, por ejemplo, caudal de punta o lluvia de cierta intensidad y duración (62,199).

**PESO VOLUMETRICO (bulk density):** En suelos es la masa de suelo seco por unidad de volumen (83,10).

**pH:** Medida numérica de la acidez, o actividad de los iones hidrógeno del suelo. El punto neutro en pH es 7.0. Todos los valores del pH inferiores a 7.0 son ácidos y los superiores son alcalinos (21,403).

**POLUCION (pollution):** Adición al agua de una sustancia contaminadora (62,174).

**PROCESO ESTOCASTICO (stochastic process):** Proceso en el cual se estudia simultáneamente la probabilidad y la secuencia de aparición de las variables (62,183).

**RELACION DE BIFURCACION (bifurcation ratio):** Relación entre el número de ramales de corriente de un orden dado en una cuenca y el número de ramales de orden superior de la misma (62,19).

**REMANSO (backwater):** Agua remansada o detenida en su curso (cauce), en comparación con su condición normal o natural (62,14).

**REPOBLACION FORESTAL (afforestation):** Conversión de terreno desnudo en terreno de bosques, por plantación de árboles (62,4).

**REPRESA PARA SEDIMENTOS (debris dam):** Una barrera construida transversalmente al cauce de una corriente para retener rocas, arena, grava limo y otros materiales - (83,17).



**RESIDUOS DE CULTIVO (crop residue):** Porción de una planta o cultivo dejando en el campo después de la cosecha (83,16).

**RIEGO (irrigation):** Aplicación de agua a los terrenos con propósitos agrícolas. Se dispone de diversos sistemas (83,29).

**RIO (river):** Corriente de agua que sirve de canal natural de drenaje en una cuenca (62,202).

**ROTACION DE CULTIVOS (crop rotation):** Cultivo de cosechas diferentes, de modo alternativo en una misma tierra (21,405).

**SALPICADURA DE GOTAS DE LLUVIA (splash):** Dispersión de gotas de agua, que alcanzan la superficie de la tierra y se reflejan hacia arriba (62,230).

**SALTACION (saltation):** Transporte de sedimentos por una corriente en tramos intermitentes. Movimiento discontinuo de partículas de sedimento por encima del suelo (en flujo de aire) o por encima del lecho (en flujo de corrientes) en una serie de saltos intermitentes (62,206).

**SEDIMENTACION (sedimentology):** Trata de la erosión, transporte y deposición de sedimentos en relación con los procesos hidrológicos, estudiando en particular la relación agua-sedimento (62,211).

**SEDIMENTOGRAMA (sediment hydrograph):** Una gráfica que representa la variación en la concentración de sedimentos con respecto al tiempo (61,201).

**SEDIMENTO (sediment):** Partículas de roca transportadas en suspensión, o depositadas por una corriente u otro cuerpo de agua, pueden expresarse en peso en gramos por litro de agua, o en volumen en centímetros cúbicos por litro (61,201).

**SERIE DE EXCEDENTES ANUALES (annual exceeding series):** Colección que está formada por valores mayores a una cierta magnitud base, la cual es determinada de manera que el número de eventos de la serie integrada sea igual al número de años de registro (10,24).

**SIMULADOR DE LLUVIA (rain simulator):** Dispositivo para aplicar agua, en forma y cantidad comparable a la lluvia natural (62,187).

**SOCAVACION (scour):** Acción erosiva, particularmente, erosión local producida por el agua en los cauces, excavando y arrastrando materiales del lecho y de las márgenes (62,208).

**SUELO (soil):** En edafología, material de la tierra que ha sido tan modificado por la acción de los agentes físicos, químicos y biológicos, que sirve de base a las raíces de las plantas (62,226).

**TERRAZA (terrace):** Terraplén o bordo de tierra construido transversalmente a una pendiente, destinado a contener el escurrimiento o reducir al mínimo la erosión del suelo (21,407).

**TERRENOS EN DESCANSO (idle land):** O en barbecho (fallow), son terrenos agrícola-mente inactivos, con una operación previa de laboreo del suelo o sin ella, durante toda o la mayor parte de la temporada de cultivo (21,408).

**TEXTURA DEL SUELO (soil texture):** Las proporciones relativas de los variados agregados del suelo (83,52).

TRANSPORTE DE LAVADO (wash load): Porción del sedimento transportado por un cauce compuesto de partículas finas (usualmente más finas que 0.062 mm.), las cuales se encuentran en pequeñas cantidades en el fondo. Prácticamente todo el transporte de lavado es llevado continuamente en suspensión y su magnitud depende de las aportaciones de este material al cauce.

TURBIDEZ (roiliness): Aspecto lechoso del agua debido a las partículas finas en suspensión, de limo o arcilla (62, 203).

VARIABLE ALEATORIA (random variable): Variable que se presenta como una serie de valores consecutivos, independientes (internamente) uno de otro (62,190).

VIDA UTIL DEL EMBALSE (life of reservoir): Período en años que el embalse rinde abastecimientos de agua útiles. Principalmente, tal lapso varía con la cantidad de sedimento depositado en él por sus corrientes y con las medidas de control o preservación aplicadas (61,140).

ZONA ARIDA (arid zone): Zona en la cual la evaporación excede siempre a la precipitación (62,292).

ZONA HUMEDA (humid zone): Zona en la que la precipitación excede o es mayor que la evaporación (62,293).

ZONA SEMIARIDA (semi-arid zone): Zona en la cual la evaporación sobrepasa frecuentemente a la precipitación (62,293).

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS UTILIZADAS.

1. AGUILO BONNIN, J. y LOPEZ CADENAS DE LLANO, F. "Estudio sobre la Erosión en una Cuenca Hidrográfica. Aplicación al Río Segura". Ponencia Presentada por el Comité Español en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el AGUA. Mar del Plata, Argentina. marzo 1977
2. BARNES, R.C. "Erosion Control Structures". chapter 28, volume II of the River Mechanics, edited and published by Hsieh Wen Shen. Fort Collins, Colorado, U.S.A. 1971
3. BEASLEY, R.P. "Erosion and Sediment Pollution Control". The Iowa State University Press. Ames, Iowa, U.S.A. 1972
4. BISTRAIN, P. "Los Azolves en las Obras Hidráulicas". vol. XIX, No. 1 de la Revista Ingeniería Hidráulica en México. México, D.F. 1965
5. BORLAND, W.M. "Reservoir Sedimentation". chapter 29, volume II of the River - Mechanics, edited and published by Hsieh Wen Shen. Fort Collins, Colorado, U.S.A. 1971
6. BORLAND, W.M. and MILLER, C.R. "Distribution of Sediment in Large Reservoirs". Transactions of the American Society of Civil Engineers, vol. 125, page 166 to 180, paper No. 3019. 1960
7. BRABDEN BA., T.E. "Reservoir Sedimentation Study, East Java, Indonesia". Report No. OD 15, Hydraulics Research Station, Wallingford, England. February - 1979
8. BROWN, C.B. "Sediment Transportation". chapter XII in Engineering Hydraulics, Proceedings of the Fourth Hydraulics Conference, Iowa Institute of Hydraulics Research, edited by Hunter Rouse. John Wiley and Sons, Inc., U.S.A. 1950
9. BRUNE, G.M. "Trap Efficiency of Reservoirs". Transactions of American Geophysical Union, vol. 34, number 3, page 407 to 418. June 1953
10. CAMPOS A., D.F. "Manual para la Estimación de Avenidas Máximas en cuencas y Presas Pequeñas". Oficina de Estudios Especiales en Hidrología, Subdirección Regional de Obras Hidráulicas en Ing. Agrícola para el desarrollo Rural, S.A.R.H. San Luis Potosí, S.L.P. México. Febrero 1979
11. CAMPOS A., D.F. "Cálculo de las Curvas Intensidad-Duración-Período de Retorno, a partir de registros de Lluvia Máxima en 24 horas y Relaciones Duración-Lluvia Promedio". Subdirección Regional Noreste de Obras Hidráulicas en Ing. Agrícola para el Desarrollo Rural, S.A.R.H. San Luis Potosí, S.L.P. México. - 1978
12. DARRACH, A.G. "Estimating Sheet-Rill Erosion and Sediment Yield on Rural and Forest Highways". U.S.D.A. Soil Conservation Service, West Technical Service Center-Portland, Oregon, U.S.A. Technical Note: Woodland-No. 12. November 1978
13. DETENAL. "Cartas Topográficas, Geológicas, Edafológicas y de Uso Potencial". México, D.F.
14. DeWIEST, R.J.M. "Geohydrology". chapter 2: Elements of Surface Hydrology, section 19, Reservoirs. John Wiley and Sons, Inc. New York, N.Y., U.S.A. January, 1965

15. DIRECCION DE HIDROLOGIA DE LA S.A.R.H. "Boletín Hidrológico No. 55. Región Hidrológica No. 37, EL SALADO". Dirección General de Estudios de la Subsecretaría de Planeación. México, D.F. 1976
16. DIRECCION DE HIDROLOGIA DE LA S.A.R.H. "Boletín de Tormentas Máximas y Probables en 24 horas". Dirección General de Estudios de la Subsecretaría de Planeación. México, D.F. 1978
17. DOUGLAS, I. "Erosion Rates and Climate: Geomorphological Implications". chapter nine in Geomorphology and Climate, edited by Edward Derbyshire. John Wiley and Sons, Ltd. London, England. 1976
18. EVANS, W.R. and KALKANIS, G. "Use of the Universal Soil Loss Equation in California. page 31 to 40 in Soil Erosion: Prediction and Control, special publication No. 21 of the Soil Conservation Society of America. Ankeny, Iowa, - U.S.A. 1977
19. ORGANIZACION DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACION. - "Erosión del Suelo por el Agua". colección FAO: Fomento de tierras y aguas - No. 7. Roma, Italia. 1967
20. FLAXMAN, E.M. "Predicting Sediment Yield in Western Unites States". Journal of the Hydraulics Division of the ASCE. vol. 2, No. 12, page 2073 to 2085. - paper 9432. december 1972
21. FOSTER B.,A. "Métodos Aprobados en Conservación de Suelos". Editorial Trillas. México, D.F. 1979
22. FOURNIER, F. "Conservación de Suelos". versión en español por Ediciones Mundo-Prensa. Madrid, España. 1975
23. GILMAN, C.S. "Rainfall". section 9 in Handbook of Applied Hydrology, editor-in-chief Ven Te Chow. McGraw-Hill Book Company. New York, N.Y., U.S.A. 1964
24. GLYMPH, L.M. "Importance of Sheet Erosion as a Source of Sediment". vol. 38, No. 6 of Transactions of American Geophysical Union, page 903 to 907. december 1957
25. GOTTSCHALK, L.C. "Reservoir Sedimentation". section 17, part I in Handbook of Applied Hydrology, editor-in-chief Ven Te Chow. McGraw-Hill Book Company. New York, N.Y., U.S.A. 1964
26. GRACIA S.,J., APARICIO M.,F.J. y MAGALLANES P.,J. "Arrastre de Suelos por Lluvia". proyecto 7060 del Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M. México, - D.F. Marzo de 1979 (estudio realizado en 1977).
27. GREENLAND, D.J. "The Magnitude and Importance of the Problem". part I, Introduction in Soil Conservation and Management in the Humid Tropics, edited by D.J. Greenland and R. Lal. A Wiley-Interscience Publication (John Wiley & Sons,LTD). London, England. 1977
28. HAMMAD, H.Y. "River Bed Degradation after Closure of Dams". Journal of Hydraulics Division, ASCE. No. 4, paper 8814, page 591 to 607. April, 1972
29. HAAN, C.T. "Statistical Methods in Hydrology". Iowa State University Press. - Ames, Iowa, U.S.A. 1977
30. HERAS, R. "La Erosión y La Sedimentación". volumen 6 (tema VI) del Manual de

Hidrología, Instituto de Hidrología del Centro de Estudios Hidrográficos. Madrid, España. Diciembre de 1972

31. HERAS R., R. "Hidrología y Recursos Hidráulicos". sección 5a.: Estudio de -- Erosión, Arrastre y Sedimentación. Centro de Estudios Hidrográficos. Madrid, España. Noviembre 1976
32. HOLEMAN, J.N. "The Sediment Yield of Major Rivers of the World". Water Resources Research, vol. 4, No. 4, page 737 to 747. August 1968
33. HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. "Reservoir Delta Sedimentation. Computer Program 23-J2-L269". Sacramento District, U.S. Army Corps of Engineers. California, U.S.A. July 1967
34. JANSEN, J.M.L. and PAINTER, R.B. "Predicting Sediment Yield from Climate and Topography". Journal of Hydrology, vol. 21, page 371 to 380. North Holland - Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands. 1974
35. JAUREGUI, E. "La Erosión Hidráulica y Eólica en México y sus efectos en las Estructuras Hidráulicas y en los Núcleos de Población". Boletín del Instituto de Geografía de la U.N.A.M., vol. III. México, D.F. 1970
36. KARASHEV, A.V. and BOGOLIUBOVA, I.V. "Computation of Reservoirs Sedimentation". Proceedings of the Madrid Symposium on Design of Water Resources Projects with Inadequate Data, page 199 to 206, volume 2. UNESCO-WMO-IAHS. Unesco: Studies and Reports in Hydrology No. 16. Paris, France. 1974
37. KELLOGG, C.E. "Soil". page 86 to 95 in Plant Agriculture, A Scientific American Book. W.H. Freeman and Company. San Francisco, U.S.A. 1970
38. KEOWN, M.P. and WEST, H.W. "Analysis and Assessment of Soil Erosion in Selected Watersheds". Report 4 of Mobility and Environmental Systems Laboratory, U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss. U.S.A. February 1978
39. KILINC, M. and RICHARDSON, E.V. "Mechanics of Soil Erosion from Overland Flow Generated by Simulated Rainfall". Hydrology paper No. 63, Colorado State University. Forto Collins, Colorado, U.S.A. september 1973
40. KIKKAWA, H. "Reservoir Sedimentation". chapter 8 in the Proceedings of the - First Seminary Japanese-American on Erosion and Sedimentation. Honolulu, Hawaii, U.S.A. Holy Week, 1978
41. KOELZER, V.A. "Reservoir Hydraulics". section 4 in Handbook of Applied Hydraulics editor-in-chief Calvin Victor Davis and co-editor Kenneth E. Sorensen. - Third edition, McGraw-Hill Book Company. New York, N.Y., U.S.A. 1969
42. LANGBEIN, W.B. and SCHUMM, S.A. "Yield of Sediment in Relation to Mean Annual Precipitation". Transactions of American Geophysical Union, vol. 39, No. 6, - page 1076 to 1084. December 1958
43. LI, RUH-MING, SIMONS, D.B., REESE, A.J. and WARD, T.J. "A Simple Method for - Estimating Sediment Yield". page 234 to 241 in Soil Erosion: Prediction and Control, special publication No. 21 of the Soil Conservation Society of America. Ankeny, Iowa, U.S.A. 1977
44. LINSLEY, R.K. y FRANZINI, J.B. "Ingeniería de los Recursos Hidráulicos". 4a.

impresión, Compañía Editorial Continental, S.A. México, D.F. junio 1972

45. LINSLEY, R.K., KOHLER, M.A. y PAULUS, J.L.H. "Hidrología para Ingenieros". - segunda edición, Editorial McGraw-Hill Latinoamericana, S.A. Bogotá, Colombia. 1977
46. LINSLEY, R.K., KOHLER, M.A. and PAULHUS, J.L.H. "Applied Hydrology". International Student Edition of McGraw-Hill Book Company and Kogakusha Company, -- Ltd. Tokyo, Japan. 1949
47. LOPEZ CADENAS DE LLANO, F. y BLANCO CRIADO, M. "Hidrología Forestal. 1a. Parte". sección de publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros - de Montes. Madrid, España. 1976
48. LOPEZ S., J.L. "Mathematical Modeling of Sediment Deposition in Reservoirs". - Hydrology paper No. 95, Colorado State University. Fort Collins, Colorado, - U.S.A. July 1978
49. MACK, F.J. "Sediment Yields in the Upper Mississippi River Basin". Paper number 4 in the Proceedings of a Seminar on Sediment Transport in Rivers and Reservoirs, The Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers. Davis, California, U.S.A. 7-9 April 1970
50. MAGALLANES PATIÑO, J. "Pérdida de Suelo en Cuencas. Aplicación en la Meseta Central". tesis presentada para obtener el título de Ing. Civil en la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M. México, D.F. 1977
51. MANER, S.B. "Factors Affecting Sediment Delivery Rates in the Red Hills Physiographic Area". Transactions of American Geophysical Union, vol. 39, No. 4, page 669 to 675. August 1958
52. MANER, S.B. "Factors Influencing Sediment Delivery Ratios in the Blackland - Prairie Land Resource Area". USDA, Soil Conservation Service, South Technical Service Center. Fort Worth, Texas, U.S.A. (10 pp.) 1962
53. MAZA A., J.A. "Socavación en Cauces Naturales". Trabajo patrocinado por la - Secretaría de Obras Públicas y publicado por el Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M., No.177. México, D.F. junio 1968
54. MAZA A., J.A. "Solid Material Contributed by a Watershed and Its variation - when Modified". Report 6, question No. 47 in The Transactions of The Twelfth International Congress on Large Dams. Mexico city, March 29-April 2, 1976
55. MCGREGOR, K.C. and MUTCHLER, C.K. "Status of the R Factor in Northern Mississippi". page 135 to 142 in Soil Erosion: Prediction and Control, special publication No. 21 of the Soil Conservation Society of America. Ankeny, Iowa, U.S.A. 1977
56. MEGAHAN, W.F. "Volume Weight of Reservoir Sediment in Forested Areas". Journal of Hydraulics Division, ASCE., HY 8, paper 9129, page 1335 to 1342. August 1972
57. MORALES G., A., MUÑOZ V., M. y SPRINGALL G., R. "Metodología para Evaluar en - una Cuenca las Obras Requeridas para el Control de Erosión". Memoria Vol. 4 del V Congreso Nacional de Hidráulica, A.M.H. Guadalajara, Jal. 14-17 Nov. - 1978

58. MURRAY, J. "Nizamsagar Project. Problems of Sedimentation Effects on Irrigated Area and Remedial Measures". Report 4, question No. 47, in the Transactions of The Twelfth International Congress on Large Dams. Mexico city, March 29-April 2, 1976
59. MUSGRAVE, C.W. "The Quantitative Evaluation of Factors in Water Erosion - A First Approximation". Journal of Soil and Water Conservation, vol. 2, No. 3, page 133 to 138. 1947
60. MUTCHLER, C.K. and YOUNG, R.A. "Soil Detachment by Raindrops". page 113 to - 117 in the Proceedings of the Sediment-Yield Workshop, USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, Mississippi, U.S.A. November 28-30, 1972
61. NELSON, A. and NELSON, K.D. "Dictionary of Water and Water Engineering". Butterworth & Co (Publishers) Ltd. London, England. 1973
62. ORGANIZACION METEOROLOGICA MUNDIAL. "Glosario Hidrológico Internacional". -- First Edition. WMO/OMM/BMO-No. 385. Ginebra, Suiza. 1974
63. ONSTAND, C.A., MUTCHLER, C.K. and BOWIE, A.J. "Predicting Sediment Yields".- page 43 to 58 in the Proceedings of National Symposium on Soil Erosion & Sedimentation by Water, sponsored by: American Society of Agricultural Engineers (ASAE). Chicago, Illinois, U.S.A. December 12th & 13th, 1977
64. ORTEGA CORDOVIN, A. "El Aterramiento de los Embalses en los Planes de Aprovechamiento Integral de una Cuenca". páginas 175 a 177, Revista de OBRAS PUBLICAS, año CXXIII, Núm. 3131. Madrid, España. Marzo 1976
65. PAIS-CUDDOU, I.C. dos M. and RAWAL, S.N.C. "Sedimentation of Reservoirs". Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE., IR 3, page 415 to 429.-- September, 1969
66. PARTL, R. "Quantitative Analysis of Reservoir Sedimentation". Report 17, question No. 47, in the Transactions of The Twelfth International Congress on -- Large Dams. Mexico city, March 29-April 2, 1976
67. PEMBERTON, E.L. "Reservoir Sedimentation". chapter 8 in the Proceedings of - the First Seminary Japanese-American on Erosion and Sedimentation. Honolulu, Hawaii, U.S.A. Holy Week, 1978
68. PIEST, R.F., KRAMER, L.A. and HEINEMANN, H.G. "Sediment Movement from Local Watersheds". page 130 to 141 in the Proceedings of the Sediment-Yield Workshop, USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, Mississippi, U.S.A. November 28-30, 1972
69. PLIEGO, J.M. "Aspectos Ambientales de los Embalses". páginas 61 a 87 en el - libro: GRANDES PRESAS, Experiencias Españolas en su Proyecto y Construcción 1976, editado por el Comité Nacional Español de Grandes Presas Madrid, España. Marzo 1976
70. RENARD, K.G. and LANE, L.J. "Sediment Yield as Related to a Stochastic Model of Ephemeral Runoff". page 253 to 263 in the Proceedings of the Sediment- -- Yield Workshop, USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, Mississippi, U.S.A. - November 28-30, 1972
71. RENDON-HERRERO, O. "A Method for the Prediction of Washload in Certain Small Watersheds". Proceedings of the Madrid Symposium on Design of Water Resources Projects with Inadequate Data. page 589 to 602, volume 2. UNESCO-WMO--



- IAHS. Unesco: Studies and Reports in Hydrology No. 16. Paris, France. 1974
72. RENDON-HERRERO, O. "Estimation of Washload Produced on Certain Small Water--sheds". Journal of Hydraulics Division, ASCE., HY 7, paper 10638, page 835 - to 848. July 1974
  73. RUIZ DE LA TORRE, ORTEZ CASAS and NIETO. "Erosion in Feeding Basins of Spanish Reservoirs; Its influence on Dams". Report 29, question No. 47, in the Transaction of The Twelfth International Congress on Large Dams. Mexico city March 29-April 2, 1976
  74. SANCHEZ B., J.L. "Consideraciones sobre el Funcionamiento Hidráulico e Hidrológico de Presas Pequeñas". páginas 39 a 50 en la memoria del Simposio sobre Almacenamientos Pequeños, patrocinada por la Secretaría de Agricultura y Ganadería. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. México, D.F. Agosto 1975
  75. SANCHEZ B., J.L. "Estudio Ecológico de la Malinche en el Estado de Tlaxcala (1a. Etapa)". Estudio realizado en el Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M. según contrato CRB-475/75, patrocinado por la Secretaría de Recursos Hidráulicos, Comisión del Río Balsas. México, D.F. Diciembre 1975
  76. SEGNER, I. "Gully Development and Sediment Yield". Journal of Hydrology, -- vol. 4, page 236 to 253. North Holland Publishing Co., Amsterdam, The Netherlands. 1966
  77. SCHWAB, G.O., FREVERT, R.K., EDMINSTER, T.W. and BARNES, K.K. "Soil and Water Conservation Engineering". second Edition. John Wiley & Sons, Inc. New York, N.Y., U.S.A. 1966
  78. SHEN, H.W. and LI, R.M. "Watershed Sediment Yield". chapter 21, volume II in Stochastic Approaches to Water Resources, edited and published by Hsieh Wen Shen. Fort Collins, Colorado, U.S.A. 1976
  79. SIMONS, D.B. and ŞENTÜRK, F. "Sediment Transport Technology". Water Resources Publications. Fort Collins, Colorado, U.S.A. 1977
  80. SINGH, V.P. "Discussion to Predicting Sediment Yield in Western United States". Journal of Hydraulics Division, ASCE. HY 10, paper 1892. October 1973
  81. SOIL CONSERVATION SERVICE, USDA. "Guide to Sedimentation Investigations". Technical Guide - 12, South Technical Service Center Area, Engineering and Watershed Planning Unit. Fort Worth, Texas, U.S.A. june 1976
  82. SOIL CONSERVATION SERVICE, USDA. "How to Control a Gully". U.S. Department of Agriculture, Farmer's Bulletin No. 2171. Washington, D.C., U.S.A. june -- 1973
  83. SOIL CONSERVATION SOCIETY OF AMERICA. "Resource Conservation Glossary". Second Edition. Ankeny, Iowa, U.S.A. 1976
  84. STEICHEN, J. "Design Criteria for Terraces". Science and Technology GUIDE, - published by The University of Missouri-Columbia Extension Division. Missouri, U.S.A.
  85. STRAND, R.I. "Sedimentation". Appendix H in the Design of Small Dams, Bureau of Reclamation, U.S. States Department of the Interior, second edition and - revised reprint. Washington, D.C., U.S.A. 1977



86. STRAND, R.I. "Bureau of Reclamation Procedures for Predicting Sediment Yield". page 10 to 15 in the Proceedings of the Sediment-Yield Workshop, USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, Mississippi, U.S.A. November 28-30, 1972
87. SZECHOWYCZ, R.W. and QURESHI, M.M. " Sedimentation in Mangla Reservoir". Journal of Hydraulics Division, ASCE., HY 9, paper 10033, page 1551 to 1572. September 1973
88. TASK COMMITTEE ON PREPARATION OF SEDIMENTATION MANUAL, ASCE. "Chapter IV: Sediment Sources and Sediment Yields". Journal of Hydraulics Division, ASCE., Committee on Sedimentation, HY 6, paper 7337, page 1283 to 1329. June, 1970
89. TASK COMMITTEE ON PREPARATION OF SEDIMENTATION MANUAL, ASCE. "Sediment Control Methods: D. Reservoirs". Journal of The Hydraulics Division, ASCE., Committee on Sedimentation, HY 4, paper 9671, page 617 to 635. April 1973
90. TASK COMMITTEE ON PREPARATION OF SEDIMENTATION MANUAL, ASCE. "Chapter V: Sediment Control Methods. Introduction and Watershed Area". Journal of the Hydraulics Division, ASCE., Committee on Sedimentation, HY 2, paper 6438, page 649 to 673. March, 1969
91. TASK COMMITTEE ON PREPARATION OF SEDIMENTATION MANUAL, ASCE. "Chapter VI: Economic Aspects of Sedimentation". Journal of the Hydraulics Division, ASCE., Committee on Sedimentation, HY 1, paper 6334, page 191 to 199. January, 1969
92. TEW, R.K. "Estimating Soil Erosion Losses from Utah Watersheds". USDA. Division of Soil and Water Management, Forest Service-Intermountain Region. Ogden, Utah, U.S.A. 1973
93. THOMAS, W.A. "Volume 12: Sediment Transport, without Appendices 6 and 7". Hydrologic Engineering Methods for Water Resources Development, The Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers. Davis, California, U.S.A. - June 1977
94. TODD, D.K. "The Water Encyclopedia". Water Information Center Publication, -- Huntington, N.Y., U.S.A. 1970
95. TURK, L.M. y FOTH, H.D. "Fundamentos de la Ciencia del Suelo". Compañía Editorial Continental, S.A. México, D.F. (2a. Impresión en español de la 5a. en inglés) Abril de 1978
96. UNIVERSITY OF MISSOURI-COLUMBIA. "Soil Erosion Control Practices". 208 Water - Quality Management Guide, Extension Information. Missouri, U.S.A.
97. UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. "Predicting Rainfall Erosion Losses. A Guide to Conservation Planning". Agriculture Handbook Number 537, prepared by Science and Education Administration in cooperation with Purdue Agricultural Experiment Station. Supersedes Agriculture Handbook No. 282, "Predicting Rainfall-Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains". Washington, D.C., U.S.A. December 1978
98. WILLIAMS, G.R. "Hydrologic Studies". chapter 2 in Handbook of Dam Engineering edited by Alfred R. Golzê, page 99 to 146. Van Nostrand Reinhold Company, New York, N.Y., U.S.A. 1977
99. WILLIAMS, J.R. and BERNDT, H.D. "Sediment Yield Computed with Universal Equation". Journal of Hydraulics Division, ASCE., HY 12, paper 9426, page 2087 to 2098. December, 1972

100. WILLIAMS, J.R. "Sediment-Yield Prediction with Universal Equation using Runoff Energy Factor". page 244 to 263 in the Proceedings of the Sediment-Yield Workshop, USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, Mississippi, U.S.A. November 28-30, 1972
101. WISCHMEIER, W.H. "Upslope Erosion Analysis". chapter 15, volume III in Environmental Impact on Rivers (River Mechanics III), edited and published by -- Hsieh Wen Shen. Fort Collins, Colorado, U.S.A. 1973
102. WISCHMEIER, W.H. "Estimating the Soil Loss Equation's Cover and Management Factor for Undisturbed Areas". page 118 to 124 in the Proceedings of the Sediment-Yield Workshop, USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, Mississippi, - U.S.A. November 28-30, 1972
103. WISCHMEIER, W.H. and SMITH, D.D. "Rainfall Energy and Its Relationship to -- Soil Loss". Transactions of American Geophysical Union, vol. 39, No. 2, page 285 to 291. April 1958
104. WISLER, C.O. and BRATER, E.F. "Hydrology". second edition, John Wiley & Sons, Inc. New York, N.Y., U.S.A. 1959
105. YOUNG, R.A. and MUTCHLER, C.K. "Soil Movement on Irregular Slopes". Water Resources Research, vol. 5, No. 5, page 1084 to 1089. October 1969
106. ZHANG, XIA, CHEN, LI, JIANG, XIA, LIN. "Regulation of Sediments in Some Medium and Small Sized Reservoirs on Heavily Silt-laden Streams in China". Report 32, question 47 (The effects on Dams and Reservoirs of Some Environmental Factors), in the Transactions of The Twelfth International Congress on - Large Dams. Mexico city, March 29-April 2, 1976

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS RECOMENDADAS:

- a. APARICIO M., F.J. "Análisis de la Producción de Sedimentos Mediante el Modelo de Stanford". Tesis presentada para obtener el título de Ing. Civil, en la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M. México, D.F. 1979
- b. BELLESSERT, B. "Bed-Load Transport Formulae". page 41 to 47 in the Tracer techniques in Sediment Transport, Technical Reports Series No. 145, International Atomic Energy Agency. Vienna, Austria. 1973
- c. BERESFORD-PEIRSE, H. "El Bosque, los Alimentos y el Hombre". Estudio Básico No. 20 de la Campaña Mundial contra el Hambre, FAO. Roma, Italia. 1968
- ch. EINSTEIN, H.A. "River Sedimentation". section 17, part II in Handbook of Applied Hydrology, editor-in-chief, Ven Te Chow. McGraw-Hill Book Company, New York, N.Y., U.S.A. 1964
- d. EL-SWAIFY, S.A. and DANGLER E.W. "Erodibilities of Selected Tropical Soils in Relation to Structural and Hydrologic Parameters". page 105 to 114 in Soil Erosion: Prediction and Control, special publication No. 21 of Soil Conservation Society of America. Ankeny, Iowa, U.S.A. 1977
- e. FOSTER, G.R. and MEYER, L.D. "A Closed-Form Soil Erosion Equation for Upland - Areas". chapter 12 in Sedimentation, Symposium to Honor Profesor H.A. Einstein, edited and published by Hsieh Wen Shen. Fort Collins, Colorado, U.S.A. 1972
- f. GARDE, R.J. and SWAMEE, P.K. "Progressive Deposition in Reservoirs Due to Sedimentation". page 1242 to 1250 in volume 3 of III World Congress on Water Resources, International Water Resources Association. México, D.F. 1979
- g. HATTINGER, H. "Torrent Control in the Mountains with Reference to the Tropics". chapter XII in Hydrological Techniques for Upstream Conservation, FAO Conservation Guide No. 2. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. 1976
- h. HEEDE H. B. "Design, Construction and Cost of Rock Check Dams". Research Paper RM-20 of the U.S. Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Fort Collins, Colorado, U.S.A. May 1966
- i. HEINEMANN, H.G. and PIEST, R.F. "Soil Erosion-Sediment Yield Research in Progress". page 149 to 159 in EOS-Trans. AGU, vol. 56, No. 3. 1975
- j. HEINEMANN, H.G. and RAUSCH, D.L. "Reservoir Sedimentation Survey Methods". chapter IV in Hydrological Techniques for Upstream Conservation, FAO Conservation Guide No. 2. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, -- Italy. 1976
- K. HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. "Reservoir Temperature Stratification". Users - Manual, U.S. Army Corps of Engineers. Davis, California, U.S.A. January 1972
- l. KLOHN, W.E. "Medición de Sedimentos en Lagos y Embalses". páginas 38 a 62 en la Publicación Aperiódica No. 22 del Servicio Colombiano de Meteorología e Hidrología. Bogotá, Colombia. Abril 1971
- m. RATOMSKI, K.J. "Hydraulic Method of Sedimentation Forecasting in Reservoirs". - report 25 in The Transactions of The Twelfth International Congress on Large - Dams, volume III, question 47. México, D.F. March 29-April 2, 1976

- n. MAZA A., J.A. "Evaluación de los Métodos para Determinar la Cantidad de Azolve en las Presas". capítulos 1 y 2 del contrato No. SP-75-65 del Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M. Trabajo patrocinado por la Secretaría de Recursos Hidráulicos. México, D.F. Noviembre 1976
- ñ. MCCOOL, D.K., MOLNAU, M., PAPENDICK, R.I. and BROOKS, F.L. "Erosion Research - in the Dryland Grain Region of the Pacific Northwest: Recent Developments and Needs". page 50 to 59 in Soil Erosion: Prediction and Control, special publication No. 21 of the Soil Conservation Society of America. Ankeny, Iowa, U.S.A. 1977
- o. MEYER, L.D. "Soil Erosion by Water on Upland Areas". chapter 27, volume II, River Mechanics, edited and published by Hsieh Wen Shen. Fort Collins, Colorado, U.S.A. 1971
- p. NATIONAL ASSOCIATION OF CONSERVATION DISTRICTS. "Suggested Guidelines and Standards for Erosion and Sediment Control Programs". League City, Texas, U.S.A. - 1972
- q. OWEN, J.B. and BRANSON, F.A. "Plant Cover, Runoff and Sediment Yield Relationships on Mancos Shale in Western Colorado". page 783 to 790 in vol. 6, No. 3 - of Water Resources Research Bulletin. June 1970
- r. RENFRO W., G. "Use of Erosion Equations and Sediment-Delivery Ratios for Predicting Sediment Yield". page 33 to 45 in Present and Protective Technology - for Predicting Sediment Yields and Sources, Proceedings of the Sediment-Yield Workshop, USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, Mississippi, U.S.A. November 28-30, 1972
- s. ROOSE, E.J. "Use of the Universal Soil Loss Equation to Predict Erosion in --- West Africa". page 60 to 74 in Soil Erosion: Prediction and Control, special publication No. 21 of Soil Conservation Society of America. Ankeny, Iowa, U.S.A. 1976
- t. ROOSEBOOM, A. "Reservoir Sediment Deposition Rates". report 21, volume III, -- question 47 in the Transactions of The Twelfth International Congress on Large Dams. México, D.F. March 29-April 2, 1976
- u. SANCHEZ CHAGOLLAN, A. "Levantamientos Hidrográficos en Vasos de Almacenamiento". páginas 175 a 187 del vol. XXIV, No. 2 de la revista Ingeniería Hidráulica en México. México, D.F. 1970
- v. SHEN, H.W. "Wash Load and Bed Load" & " Total Sediment Load". chapters 11 and 13 in the River Mechanics, vol. I, edited and Published by Hsieh Wen Shen. Fort Collins, Colorado, U.S.A. 1971
- w. SMITH, J.H., DAVIS, D.R. and FOGEL, M. "Determination of Sediment Yield by --- Transferring Rainfall Data". vol. 13, No. 3 of Water Resources Bulletin. American Water Resources Association. June 1977
- x. SMITH, D.I. and STOPP, P. "The River Basin. An Introduction to the Study of Hydrology". Cambridge University Press. Great Britain. 1978
- y. STEICHEN, J. "Design Criteria for Debris Basins". Science and Technology GUIDE published by the University of Missouri-Columbia Extension Division. U.S.A.
- z. TYWONIOK, N. "Sediment Discharge Computation Procedures". Journal of Hydraulics Division of the ASCE., No. 3, page 521 to 540. 1972

F/DEPFI/D-24/1981



702256