

METODOLOGIAS DE PREDICCIÓN DE PERDIDAS DE SUELO POR EROSIÓN HÍDRICA. Revisión Bibliográfica. Sandra Perret Durán. Ingeniero Forestal, División Silvicultura, Instituto Forestal.

INTRODUCCION

En las zonas áridas y semiáridas, a causa de la acción del hombre, se ha destruido la cubierta vegetal arbórea y arbustiva que protegía al suelo de la lluvia.

Las lluvias, aunque escasas, exhiben características de torrencialidad, lo cual erosiona el suelo provocando grandes pérdidas y conformando el desolado paisaje que actualmente caracteriza a estas zonas.

A lo anterior se suman las prácticas inadecuadas de uso de los suelos, que contribuyen a acelerar aún más el proceso de desertificación.

El agua, principal agente erosivo, afecta la productividad del suelo, empobreciéndolo a tal grado que provoca finalmente un efecto negativo en la calidad de vida de las poblaciones que en él habitan, en especial de las comunidades rurales.

El fenómeno erosión, puede ser evaluado y cuantificado de acuerdo al monto de suelo perdido (t/ha/año) de modo de expresar cuantitativamente la magnitud del daño.

El fin que persigue el presente trabajo es recopilar algunas metodologías indicadas en la bibliografía, de preferencia aquellas de uso más común y que constituyen un marco referencial para la estimación de la erosión hídrica.

ANTECEDENTES GENERALES

Al observar cualquier paisaje se distinguen en él cuatro grandes actores de la naturaleza: la topografía, el suelo, el clima y los seres vivos. Estos componentes no actúan por separado pues poseen múltiples relaciones que los hacen indispensables a cada uno de ellos.

Si se observa al actor clima se verá que forman parte de él las nubes, la neblina, la lluvia, la nieve, el granizo, la radiación solar, el viento, etcétera y cada uno de estos elementos tiene relación con el agua.

Es así como el ciclo hidrológico tiene su dinámica propia, la que se inicia cuando el agua precipita, luego escurre, se infiltra y pasa a formar parte de ríos, lagos, mares y océanos, después se evapora y así nuevamente llega a la atmósfera para formar las nubes y volver a precipitar cerrando el ciclo.

Pero como se dijo anteriormente este actor clima no está solo, sino que interactúa con los demás, pues la dinámica del agua le permite, a través de su movimiento constante, relacionarse con todos los otros actores antes mencionados.

El grado de penetración del agua en el suelo va a depender de la naturaleza de este, es decir de la relación existente entre la capacidad erosiva de las gotas de lluvia, el flujo de escorrentía superficial (erosividad) y la vulnerabilidad o susceptibilidad del suelo para ser erosionado (erodabilidad). Esta última, referida a sus características internas (textura, estructura, porosidad, permeabilidad, etc) y externas (cubierta vegetal existente, topografía, relieve y otras).

Todo esto analizado en forma natural aparentemente no constituye un gran problema, pero el hombre ha alterado tan drásticamente el componente biológico, especialmente en lo que se refiere a la cobertura vegetal, que este ya no cumple eficientemente su papel de regulador del ciclo hidrológico. La vegetación en forma natural intercepta el agua de lluvia, aumenta la capacidad de infiltración y disminuye la escorrentía superficial.

Las pérdidas de suelo producidas por la erosión hídrica están controladas por una serie de variables, que relacionan el clima, las condiciones edafológicas, la topografía, la vegetación y los usos del suelo. De todas ellas, la lluvia actúa de forma activa al incorporar energía al sistema erosivo, lo que provoca la disgregación de las capas superficiales del suelo y genera la escorrentía. Ante este factor, el suelo presenta una mayor o menor resistencia, es un factor eminentemente pasivo, mientras que la topografía y los usos del suelo, actúan como amplificadores o retardadores del proceso (Ipinza, R. y Perret, S. 1991).

Con el objeto de esquematizar mejor las relaciones antes mencionadas, se incluye el diagrama de la Figura N° 1.

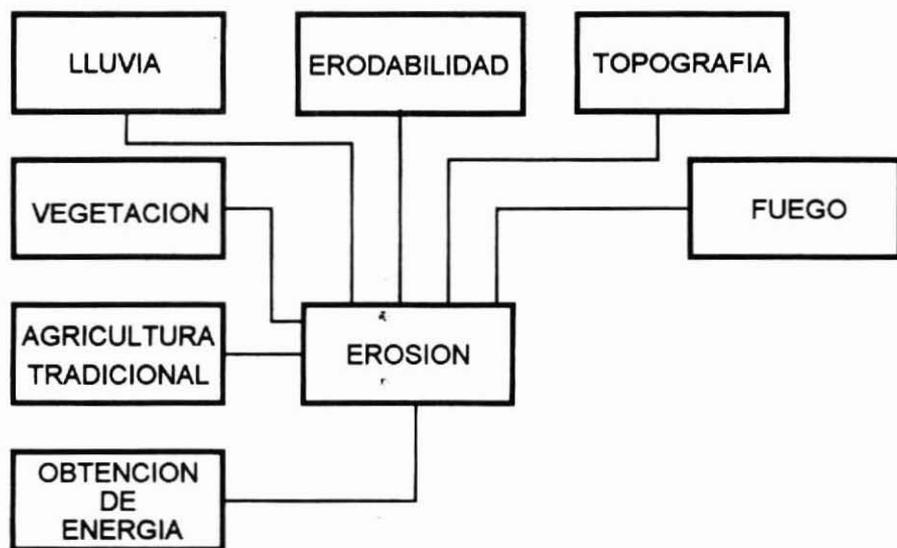


Figura N° 1: VARIABLES QUE INCIDEN EN LA EROSION

La grave situación de deterioro en la calidad de vida de la población, ha sido causada por un deterioro del medio. La toma de decisiones sobre cuanto invertir para controlar la erosión exige hacer predicciones de pérdidas de suelo y producción de sedimentos para así poder evaluar las pérdidas de productividad.

Un diagnóstico real de la situación se obtendrá al hacer una cuantificación del monto de pérdida de suelos ocasionado por la erosión hídrica.

A continuación se da una breve reseña sobre algunas metodologías para la cuantificación de las pérdidas de suelo por efecto del agua.

METODOLOGÍAS DE ESTIMACION DE EROSION

Las distintas metodologías de evaluación difieren según su forma y su grado de sensibilidad. Unas son muy sencillas y económicas, otras requieren de equipos más complejos e infraestructuras específicas de instrumental y, en consecuencia, implican mayores costos.

A continuación se exponen los métodos más conocidos y difundidos para la evaluación de pérdidas de suelo.

Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), 1965

La USLE (Universal Soil Loss Equation) es un método que estima la erosión hídrica en función de parámetros como el tipo de suelo, topografía, clima, cobertura vegetal y prácticas de manejo (Peña, 1989).

Para el desarrollo de este modelo determinístico, Wischmeier y Smith (1965), citados por FAO (1967), utilizaron datos provenientes de más de 8.000 parcelas experimentales de los Estados Unidos.

La ecuación obtenida con estos datos adquiere la siguiente forma:

$$A = 0,224 \times R \times K \times LS \times C \times P$$

- Donde: A = Pérdida de Suelo (t/ha/año)
 R = Factor de Erosividad de la Lluvia
 K = Factor de Erodabilidad del Suelo
 LS = Factor de Relieve
 C = Factor de Cobertura
 P = Factor de Prácticas Conservacionistas

Factor de Erosividad de la Lluvia (R)

El factor R define en que medida las lluvias erosionan la superficie del suelo

desnudo. Lo que resulta de la sumatoria de los productos a lo largo del año, de la energía cinética total de la lluvia y su intensidad máxima en 30 minutos.

La energía cinética unitaria (Eu) se calcula a partir de la siguiente expresión y depende principalmente de la intensidad de lluvia (I):

$$Eu = 1,213 + 0,890 \text{Log}_{10} I$$

Donde: Eu = Energía cinética unitaria (kg/m² por mm de precipitación)
I = Intensidad de lluvia (mm/h)

Luego la energía cinética total (E) es:

$$E = \sum_{i=1}^n (1,213 + 0,890 \text{Log}_{10} I_i) \times I_i \times T_i$$

Donde: T = Período de lluvia homogénea (h).
I = Intensidad de lluvia homogénea (mm/h).
i = Número de mediciones consideradas para la estimación.

La intensidad máxima en 30 minutos I_{30} es otra componente de la ecuación para estimar R.

Donde finalmente R queda como:

$$R = \frac{E \times I_{30}}{100}$$

Donde: R = Factor de erosividad de las lluvias
 I_{30} = Intensidad máxima de lluvia en 30 minutos (mm/h).

Factor de Erodabilidad del Suelo (K)

Este factor entrega una relación de la aptitud o resistencia que poseen los suelos a la erosión en forma cuantitativa. Su determinación requiere de parcelas preestabilizadas y predefinidas (9 % de pendiente, 1,83 x 22,13 m y

con una superficie en barbecho constante a favor de la pendiente). Cuando se cumplen las condiciones ya citadas, los factores LS, C y P tienen un valor de 1, quedando $K = A / R$.

La medición directa de este parámetro es muy costosa y complicada. Es por esto que un grupo de investigadores (Barnett, Diseker, Richardson y Rogers, 1966), desarrollaron la siguiente ecuación para estimar K.

$$K = \frac{2,1 \times M^{1,14} \times (10^{-4}) \times (12 - a) + 3,25 \times (b - 2) + 2,5 \times (c - 3)}{100}$$

Donde: M = Tamaño de partícula.

(% limo + % arena fina) x (100 - % arcilla).

a = % de materia orgánica

b = Código que está en función de la estructura del suelo (1 granular muy fina, 2 granular fina, 3 granular media a gruesa y 4 masiva o de bloque).

c = Clase de permeabilidad del perfil (1 rápida, 2 moderada a rápida, 3 moderada, 4 moderada a lenta, 5 lenta, 6 muy lenta).

Luego para llevar al sistema métrico el valor de K se multiplica por 1,292, que equivale a la condición de parcela estándar (22,13 m y 9% de pendiente).

Factor de Relieve (LS)

Este factor posee dos componentes: L = distancia desde el punto en que se inicia la escorrentía hasta donde la pendiente es mínima y se produce la depositación del material (m).

S = pendiente (%).

La ecuación para su estimación es la siguiente:

$$LS = (X / 22,13)^m \times (0,065 + 0,045 \times S + 0,0065 \times S^2)$$

Donde: X = Longitud de la pendiente (m)

m = toma distintos valores según la gradientes S

Si:	$S = 5 \%$	$m = 0,5$
	$3 \% \leq S < 5 \%$	$m = 0,4$
	$1 \% \leq S < 3 \%$	$m = 0,3$
	$S < 1 \%$	$m = 0,2$

Factor de Cobertura (C)

Este factor representa el efecto amortiguador que posee la vegetación en la pérdida de suelo y se estima en forma experimental al confrontar los datos obtenidos con una parcela a suelo desnudo.

Factor de Prácticas Conservacionistas (P)

Este factor mide el efecto que las técnicas de cultivos ejercen sobre la pérdida de suelo y varía en valor de 0 a 1 siendo $P = 1$ cuando el suelo no tiene ninguna práctica de conservación de suelo.

Conclusiones Sobre la USLE

Es un procedimiento cuantitativo de evaluación de pérdida de suelo, de carácter universal, se puede emplear en cualquier región, pues sus parámetros son adaptables a las situaciones locales.

Una vez determinados los parámetros, la ecuación constituye una herramienta para identificar las áreas de mayor riesgo de erosión.

Los parámetros que definen la ecuación son de gran complejidad, lo cual implica costos elevados, considerable tiempo y equipos complejos.

Algunas limitaciones para su aplicación están dadas por el hecho de que los valores de las constantes para estimar el factor de erosividad de la lluvia R, corresponden a un promedio de 22 años de pluviometría, luego predicciones con menos datos pueden conducir a errores en la estimación. Además, no se

recomienda extrapolar datos más allá del período en que se derivó la ecuación, sobre todo para el factor LS, ya que la factibilidad de introducir errores será mayor.

Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE), 1975

A partir de la década de 1970, se extendió el modelo USLE a pequeñas cuencas hidrográficas, lo cual dio origen al modelo MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation), a fin de poder determinar los sedimentos aportados por las cuencas para un aguacero concreto (Mintegui, López, 1990).

El científico que logra ajustar el modelo MUSLE en forma definitiva es J.R. Willians (1975) y queda expresado de la siguiente forma:

$$Y = 11,8(Qq_p)^{0,56} K \times LS \times C \times P$$

Donde: Y = Sedimentos acumulados por una tormenta aislada en un tiempo (t).

Q = Volumen de escorrentía (m³)

q_p = Caudal instantáneo máximo (m³ /s)

Este modelo entrega, al incorporar sus dos primeros términos, el efecto que produce el flujo de escorrentía en el proceso erosivo, tanto en volumen total del caudal escurrido Q (m³) como el caudal punta q_p (m³/s) (Mintegui, Robredo, 1991). Los restantes términos fueron descritos en el punto anterior y los principios y conceptos rigen de la misma forma. Si se esquematiza este razonamiento de lo que significa la USLE y como interviene la MUSLE queda de la siguiente forma:

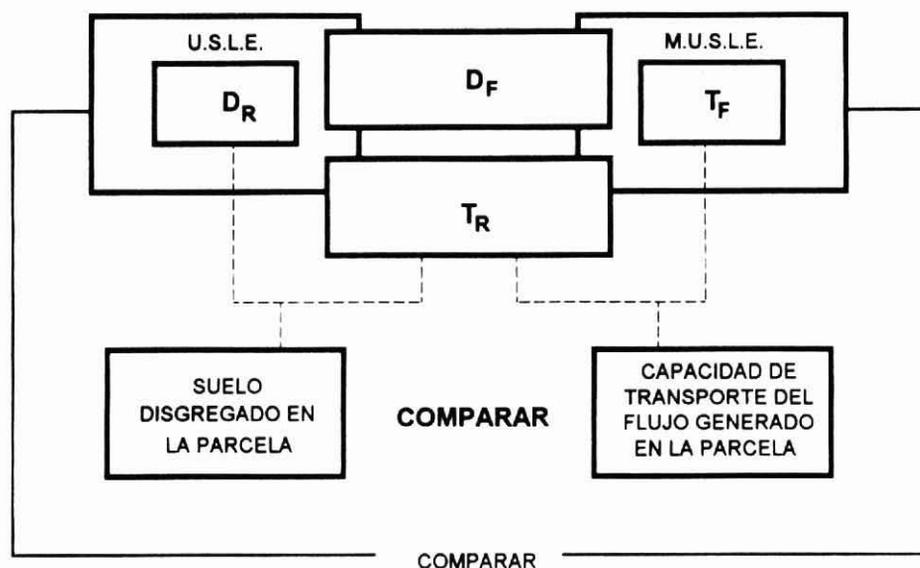


Figura N° 2. RELACION USLE - MUSLE.

- D: Disgregación de partículas del suelo en la parcela
- T: Transporte de las partículas disgregadas fuera de la parcela
- r: Impacto o salpicadura de la gota de lluvia
- f: Impacto producido por efecto del flujo de escorrentía superficial.

El desarrollo de estas ecuaciones, para generalizarlas a cuencas de mayor superficie y con series de datos más completas de precipitaciones aisladas, trajo aparejada la formulación de modelos hidrológicos, entre los cuales se destacan el HYMO y HEC-1 (1984) (Mintegui, López, 1990).

Modelo de Fournier, 1960

Este método estima la degradación de una cuenca en función de la precipitación anual, temperatura y relieve.

Para la determinación de este modelo, Fournier utilizó datos provenientes de 96 cuencas pluviales repartidas en distintas zonas del planeta, en las cuales definió analíticamente el comportamiento de la erosión (López Cadena y Blanco, 1968).

El primer paso a seguir fue analizar por separado las cuencas que disponían de mayor número de años de observación climatológica y de pérdidas de suelo. En función de este análisis se determinó que aquellas cuencas con degradación elevada tenían lluvias en un período muy corto y una distribución desigual, en cambio las de menor pérdida eran aquellas con régimen hídrico más uniforme. De esta conclusión comenzó el análisis de otras variables como:

Coefficiente P/n

Esta dado por el cociente entre la precipitación anual P (mm) y el número de días de lluvia en el año n . Este coeficiente mide la concentración pluvial y la abundancia de lluvias.

Sin embargo, este coeficiente presenta desventajas ya que para P/n similares no se muestran las reales intensidades de pérdida de suelos.

Coefficiente S/P

Siendo P la precipitación anual (mm) y S la altura de agua caída durante la estación de mayor precipitación, S se calcula por la sumatoria de los tres meses consecutivos que dan mayor altura de agua caída. Este coeficiente refleja la distribución de lluvias durante el año. A partir del coeficiente se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- A medida que la relación S/P es mayor, la tendencia de aumento de la erosión es mayor, y esto es más significativo en terrenos con relieve accidentado.
- Para valores intermedios de S/P las conclusiones no están claras por lo cual se analizaron otros coeficientes, como por ej. $(S/P) \times P^2$, $(S/P)^2$, $(S/P) \times S$, pero en definitiva ninguno de estos nuevos coeficientes aportaron mejores relaciones que las obtenidas al utilizar S/P y S^2/P .

Coeficientes p/P

En este caso p representa la precipitación del mes más lluvioso del año (mm) y P la precipitación media anual en (mm).

Haciendo un análisis de las cuencas en estudio, para aquellas con relieves poco accidentado los valores de la relación p/P fueron muy variados, por lo que se buscó una nueva relación que permitiera una mayor confiabilidad en ellos. En forma similar que con S^2/P se determinó un nuevo coeficiente, p^2/P (Índice de Agresividad del Clima). Cabe hacer notar que este coeficiente debe ser analizado año a año en función de la precipitación del mes más lluvioso, para poder trabajar con un mínimo nivel de garantía.

Coeficiente Orográfico (Co)

En donde Co es una relación entre la altura media de la cuenca y la tangente de la altura media de la cuenca y la superficie de la cuenca, es decir:

$$Co = H \times tg_x$$

$$tg_x = \frac{H}{A}$$

Donde: H = Altura de la cuenca (m)

A = Superficie de la cuenca (km^2)

La altura media se puede calcular a partir de un gráfico que relacione altura por superficie de la cuenca.

$$H = \text{Area bajo la Curva} / \text{Superficie.}$$

Luego reemplazando se tiene que:

$$Co = H \times H / A \Rightarrow Co = H^2 / A$$



En resumen, en base a estos dos últimos parámetros, es decir p^2/P y Co , se establecieron cuatro grupos de cuencas, en los cuales se puede determinar la pérdida anual de suelos a través de la siguiente regresión matemática.

$$y = a + bx$$

Donde: y = Pérdida de suelo (t/km^2 /año)

x = p^2/P

Aplicando la expresión se obtuvo la información del Cuadro N° 1.

Cuadro N° 1

GRUPOS DE CUENCAS

Grupo	Condiciones	Ecuación Asociada
Cuenca A	$p^2/P < 20$ $Co < 6$	$y = 6,14 x - 49,78$
Cuenca B	$p^2/P > 20$ $Co < 6$	$y = 27,12 x - 475,40$
Cuenca C	$Co > 6$ Clima no Semiárido	$y = 52,49 x - 513,21$
Cuenca D	$Co > 6$ Clima Semiárido	$y = 91,78 x - 737,62$

Método de M. Djorovic

Este modelo para la medición de los caudales sólidos transportados por la red hidrográfica, fue desarrollado por M. Djorovic del Instituto Forestal de Industrias de la Madera de Belgrado, basado en otros estudios realizados en Godelica y Río Morava del Sur (Mintegui, López, 1990).

El modelo sirve para calcular la degradación en volumen de sedimentos por año, en cuencas no muy extensas y con características de torrencialidad. Sus principios matemáticos se basan en la concurrencia de parámetros tales como: precipitación, suelo, relieve y vegetación, incluyendo además un parámetro que estima la influencia del grado de erosión presente en la cuenca y el tipo de erosión predominante.

La ecuación que define este modelo es la siguiente:

$$W = T \times P \times \pi \times \sqrt{Z^3} \times F$$

- Donde: W : Caudal sólido (m³/año) (degradación específica de una cuenca).
 T : Factor de temperatura que queda definido por:

$$T = \sqrt{\frac{t_0}{10} + 1}$$

t_0 : temperatura media anual (°C)

- P : Precipitación media anual en mm
 π : 3,1416
 F : Superficie de la cuenca en (km²)
 Z : Coeficiente de erosión que refleja la intensidad y extensión del fenómeno erosivo de una cuenca, en función de la valoración de los factores suelo, vegetación y relieve, definido por:

$$Z = Y \times X \times (a + \sqrt{S})$$

- Donde: Y : Coeficiente adimensional de erodabilidad del suelo que varía de 0,5 para los suelos con buena estructura menos erosionables, a 2,0 para arenas, gravas y suelos sueltos.
 X : Coeficiente adimensional que cuantifica el estado de la cubierta vegetal y las prácticas de conservación de suelo.
 a : Coeficiente adimensional que cuantifica el grado de erosión de la cuenca en estudio, sus valores oscilan de 0,1 para cuencas con procesos erosivos manifiestos en toda la superficie, hasta 0,2 para aquellos que presentan pequeños deslizamientos de márgenes dentro de la red de drenaje.
 S : Pendiente media de la cuenca, como parámetro que representa el factor relieve (%).

Sin embargo se recomienda obtener el valor de Z por medio de un promedio ponderado en relación a la superficie, es decir, separar en subunidades que permitan una aproximación más certera de Z, siempre y cuando sea factible de

acuerdo a los objetivos del proyecto.

Luego la expresión ponderada de Z queda:

$$Z = \frac{\sum Z_i \times F_i}{F}$$

De acuerdo a los estudios efectuados con este modelo los valores de Z obtenidos dieron origen a una tabla de clasificación de los procesos erosivos en 5 categorías.

I	EROSION EXCESIVA	: 1,01 ≤ Z < 1,50
II	EROSION INTENSA	: 0,71 ≤ Z < 1,01
III	EROSION MEDIA	: 0,41 ≤ Z < 0,71
IV	EROSION DEBIL	: 0,20 ≤ Z < 0,41
V	EROSION MUY DEBIL	: 0,01 ≤ Z < 0,20

Modelo de Fleming

Este modelo de estimación de sedimentos en suspensión, fue desarrollado por Fleming en Estados Unidos y para ello utilizó datos de más de 250 cuencas en diferentes países del mundo.

En base a estos antecedentes definió una tasa media anual de transporte de sedimentos, en función del caudal medio anual y de los grados de cobertura vegetal.

La ecuación propuesta para esta estimación es:

$$Q_s = a \times Q^n$$

Donde: Q_s : Transporte medio anual en suspensión (t).
 Q : Caudal medio anual (m^3/s)
 a y n : Constantes

Fleming desarrolló los valores del Cuadro N° 2 para a y n, en función de la cobertura vegetal.

Cuadro N° 2

VALORES DE LAS CONSTANTES SEGÚN COBERTURA VEGETAL

Cobertura	n	a
Bosques de hoja ancha y coníferas	1,02	117,000
Bosques de coníferas y pastos altos	0,82	3,523
Pastos bajos y arbustos	0,65	19,260
Desierto y arbustos	0,72	37,760

Para el cálculo del caudal medio en cuencas sin datos, se pueden obtener los valores por medio de fórmulas empíricas, de las cuales existen un sin número en la literatura (Ayes, 1960). Se pueden encontrar distintas variantes para el cálculo del caudal, por esto es necesario saber de ante mano las condiciones en donde se van a aplicar y determinar la factibilidad de emplearlas en función de los requerimientos y deducción de cada una de ellas (Mintegui, Robredo, 1991).

Como ejemplo se puede usar la siguiente fórmula :

$$Q = \frac{P \times S \times e}{b}$$

- Donde: P : Precipitación anual (mm)
 S : Superficie de la cuenca (m²)
 e : Coeficiente de escorrentía.
 b : Número de segundos que posee un año (315.576 x 10⁵)

Este modelo puede arrojar errores de estimación de hasta un 50 %, por lo que su uso debe ser solo referencial.

CONCLUSIONES

- Todo modelo utilizado para estimar las pérdidas de suelo por efecto de las lluvias, debe comenzar por analizar las precipitaciones, tanto la intensidad, distribución, torrencialidad en períodos por lo general menores a 24 horas y sus valores extremos, para una serie de tiempo lo más completa posible.
- Las metodologías expuestas en este trabajo a excepción de la USLE y MUSLE, poseen la ventaja de no necesitar información que requiera de estudios relativamente acabados para su análisis.
- De estas metodologías cabe señalar que la de Fleming solo es recomendable para tener como referencia los sedimentos en suspensión en aquellas cuencas que no poseen datos y cuya superficie es pequeña.
- La de Fournier en tanto, no es recomendable para climas áridos, de características torrenciales y de superficies pequeñas, se recomienda para cuencas de superficie mayor o igual a 1.000 km².
- La determinación de la carga del lecho propuesta por Djorovic puede ser aplicada tanto en la superficie total de la cuenca como en partes de ella, ya que sus parámetros reflejan de mejor forma el proceso precipitación - escorrentía.
- Finalmente, como recomendación, se puede señalar que para que estas metodologías reflejen la realidad de los procesos erosivos en el país, es necesario realizar investigaciones que permitan calibrarlos para las distintas situaciones presentes, como también lograr implementar la ecuación universal de pérdida de suelo, de manera de poder comprender el fenómeno hídrico y sus consecuencias para el recurso suelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Ayres, Q. 1960. La Erosión del Suelo y su Control. Ediciones Omega S.A. Barcelona, España. Omega 441 p.
- FAO. 1967. La Erosión del Suelo por el Agua. Roma, FAO. 207 p.

Ipinza, R. y Perret, S., 1991. El Impacto de la Erosión en Chile. Documento solicitado por las Comisiones Unidas de Recursos Naturales, Bienes Nacionales y Medio Ambiente de la Cámara de Diputados. Chile, 20 p.

IREN-CORFO-CIFCA. 1978. Los Recursos Naturales. Curso Seminario sobre Metodología para el Desarrollo de Zonas en Desertificación.

López Cadena, F. y Blanco, M. 1968. Aspectos Cualitativos y Cuantitativos de la Erosión Hídrica y del Transporte y Depósito de Materiales. Madrid, España. Ed. Ministerio de Agricultura. Madrid, España. 190 p.

Mintegui, J.A. y López U., F., 1990. La Ordenación Agrohidrológica en la Planificación. España. Departamento de Agricultura y Pesca del Gobierno Vasco, 306 p.

Mintegui, J.A. y Robredo, J.C., 1991. Fundamentos Hidrológicos de la Preparación del Suelo para las Repoblaciones Forestales en Zonas Semiáridas, con Precipitaciones de Carácter Torrencial. E.T.S.I. Montes, Madrid, España. 25 pág. (Apuntes).

Peña, L., 1989. Hidrología y Manejo de Cuencas. Curso de Perfeccionamiento. Chile. 82 pág. 24 Abril - 6 Mayo Chillán. U. de Concepción, Fac. de Ciencias Agropecuarias y Forestales.

