



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES  
DEPARTAMENTO DE SILVICULTURA

**APUNTES DOCENTES**

**USO Y CONSERVACIÓN DE SUELOS**

**“USO DE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDAS DE SUELO (USLE)  
EN EL CAMPO FORESTAL”**

**Gabriel A. Mancilla Escobar**  
Ingeniero Forestal  
MS, Ph.D.

**Agosto, 2008**

## CONTENIDO

<b>PRÓLOGO</b>	<b>3</b>
<b>La Ecuación Universal de Pérdidas de Suelos (U.S.L.E., Universal Soil Loss Equation):</b>	
<b>Generalidades.</b>	<b>4</b>
Cálculo de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo.	7
2.1 Determinación del factor R (erosividad de la lluvia)	7
2.1.1 Método normal de USLE	7
2.1.2 Método alternativo	11
2.2 Determinación del factor K (erodabilidad del suelo)	14
2.2.1 Método de la ecuación	16
2.2.2 Método gráfico	17
2.3 Determinación de los factores topográficos L y S (longitud y grado de la pendiente, respectivamente)	19
2.3.1 Cálculo de L y S	19
2.3.2 Cálculo de L y S en pendientes compuestas	21
2.4 Determinación del factor C (cubierta vegetal y manejo del recurso)	24
2.4.1 Valores tabulados para terrenos boscosos	25
2.4.2 Factor C por el método de los sub-factores	29
2.4.2.1 Evaluación de los sub-factores	37
2.4.2.2 Ejemplos de cálculo de C mediante sub-factores	43
2.4.3 ¿Cómo discernir de cuándo usar un valor C directo o emplear sub-factores?	45
2.4.4 Valores tabulados para sitios de construcción	46
2.5 Determinación del factor P (prácticas de conservación)	48
<b>Empleo práctico de la USLE</b>	<b>50</b>
3.1 Problemas resueltos	51
3.2 Problemas a resolver	61
<b>Referencias</b>	<b>63</b>

---

# PRÓLOGO

---

Tradicionalmente la Ingeniería Forestal ha sido vinculada al manejo de bosques con fines productivos y a la protección de la vida silvestre. Sin embargo, la formación del profesional forestal incluye aspectos complementarios que no son habitualmente resaltados y a los cuales, a decir verdad, no se les ha entregado mayor dedicación ni importancia en los organismos o empresas relacionadas a la actividad industrial o silvícola.

Ligado al argumento anterior, el suelo es descrito como el sustrato mineral que sostiene y nutre la vegetación. De manera usual, la labor del Ingeniero Forestal respecto al suelo es su descripción y establecimiento de características nutricionales para las plantas, de tal manera de aplicar fertilización en caso de ser requerida. No obstante, los requerimientos actuales de planes de manejo y la necesidad de cumplimiento de diversas normativas internacionales, demandan a los profesionales ambientales a conocer y manejar diversas técnicas y alternativas de acción que tiendan a la minimización de los impactos nocivos sobre los componentes de los ecosistemas.

La denominada “Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo” (Universal Soil Loss Equation, USLE), fue diseñada para la predicción de erosión en suelos preferentemente agrícolas y con base anual. No obstante, contiene algunos índices y factores que, con la debida adaptación, hacen que la ecuación pueda también utilizarse en algunas situaciones de manejo forestal.

El presente trabajo docente está vinculado al empleo de USLE para planificación de labores de manejo forestal, que, de una forma didáctica, permita describir la utilidad potencial de esta herramienta para asesorar dichas faenas. La publicación está dirigida a los estudiantes de la cátedra de Uso y Conservación de Suelos de la carrera de Ingeniería Forestal de la Universidad de Chile.

## **LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDAS DE SUELOS (U.S.L.E., UNIVERSAL SOIL LOSS EQUATION): GENERALIDADES.**

---

La USLE corresponde al resultado de múltiples esfuerzos teóricos y de campo incentivados por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), en la primera mitad del siglo 20. Los estudios fueron compilados por los investigadores Walter Wischmeier y Dwight Smith, quienes presentaron el modelo elaborado de USLE en 1954, como un esfuerzo conjunto entre USDA y la Universidad de Purdue.

A pesar del carácter “universal” que se le asignó, el modelo USLE basó sus datos y calibraciones en los distintos suelos encontrados en Estados Unidos, incluyendo los territorios de Hawai y Puerto Rico. En total, se estima que fueron utilizadas más de 10.000 parcelas por año, para la elaboración del modelo.

El modelo USLE cobró notoriedad en Estados Unidos, donde comenzó a ser utilizado con propiedad para la predicción de pérdidas de suelo y la planificación y de actividades agrícolas. Asimismo, diversos investigadores a nivel mundial aplicaron la USLE a respectivas situaciones locales, lo cual permitía, además de probar la calidad de las estimaciones en latitudes diferentes de las que fue establecida, ampliar el espectro de posibilidades de la ecuación.

La Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo permite predecir la pérdida anual de suelo por hectárea y también precisar, según esto, las técnicas más apropiadas para el laboreo del suelo, en especial para cultivos agrícolas. Como fue ya mencionado, el modelo USLE contó con un fundamento empírico consistente en un amplio número de parcelas de escurrimiento. La mayor parte de dichas parcelas se mantenían en barbecho y constaban de 22,1 metros de longitud y 3,6 metros de ancho, sobre un terreno con 9% de pendiente (figura 1). De esta manera, USLE utiliza como base dicho modelo de parcela, efectuando sus estimaciones en torno a la proporción de pérdida de suelo que ocurriría en las condiciones que el usuario presenta, respecto a la situación base especificada.

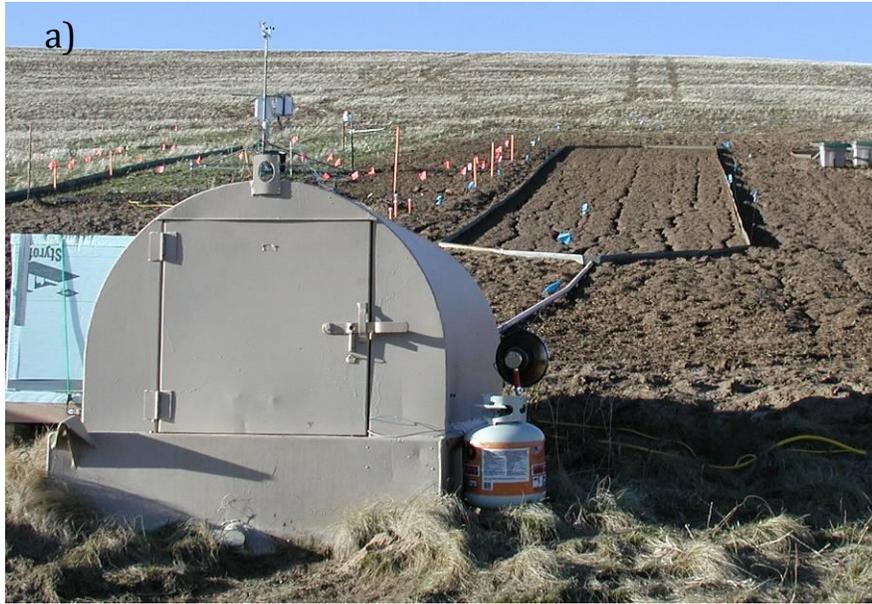


Figura 1: Parcela de escurrimiento tipo USLE, en la Estación Experimental de USDA – ARS (Agricultural Research Service) de Palouse, estado de Washington, Estados Unidos. a) Vista desde cabina del contenedor, b) Vista desde sección superior de la parcela (fotografías tomadas por el autor).

La representación matemática de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo es:

$$\mathbf{A} = \mathbf{R} * \mathbf{K} * \mathbf{L} * \mathbf{S} * \mathbf{C} * \mathbf{P} \quad (1)$$

en donde:

**A** = pérdida media anual de suelo (expresado en unidades escogidas para K, y período abarcado en R, ton- ha<sup>-1</sup> - año<sup>-1</sup>).

**R** = erosividad de la lluvia, en MJ-cm-ha<sup>-1</sup>-h<sup>-1</sup>.

**K**= erodabilidad del suelo, expresado en ton-ha-h-MJ<sup>-1</sup>-ha<sup>-1</sup>-cm<sup>-1</sup>.

**L**= longitud de la pendiente, en metros.

**S**= pendiente, en m-m<sup>-1</sup>.

**C**= cubierta vegetal y manejo del recurso, sin unidades de medida.

**P**= técnica de conservación aplicada (cultivo en contorno, fajas o terrazas), sin unidades de medida.

En el presente documento se trabaja con las unidades expresadas en el Sistema Internacional. Originalmente, la USLE fue expresada en unidades inglesas. Por este motivo, algunas ecuaciones o fórmulas encontradas en los documentos iniciales de este modelo (USDA Agriculture Handbook números 282 del año 1965, o bien el Agriculture Handbook número 537 de 1978) difieren de las que constan en este Apunte Docente.

## CÁLCULO DE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDAS DE SUELO.

---

Para la predicción de pérdidas de suelo a través de USLE, es necesario valorar cada uno de sus factores. Esto se realiza mediante la observación de parámetros de diversa índole, los cuales pueden cuantificarse directamente. Sin embargo, muchas veces la experiencia, el contraste con otras situaciones similares, o bien la formación integral del profesional relacionada a las dinámicas ecosistémicas (en la cual los Ingenieros Forestales tienen gran ventaja), proporcionan el criterio técnico y el “buen juicio” para evaluar parámetros sin la necesidad de recurrir a costosos análisis. Aún así, es conveniente reunir antecedentes históricos de las áreas que se requiera clasificar en términos de montos de erosión.

A continuación se entregan las maneras más óptimas para la estimación de cada uno de los factores de la ecuación USLE.

---

### 2.1 DETERMINACIÓN DEL FACTOR R (EROSIVIDAD DE LA LLUVIA)

---

#### 2.1.1 MÉTODO NORMAL DE USLE

El factor R de erosividad corresponde a la sumatoria de los productos de las energías de todos los eventos de lluvias erosivas anuales con sus respectivas intensidades máximas en 30 minutos ( $\sum E \cdot I_{30}$ ), lo cual da una idea de la agresividad con que la precipitación influye en el proceso de degradación del suelo por erosión hídrica. Como un evento de lluvia erosiva se considera a toda precipitación igual o mayor que 12,7 milímetros de agua caída, separada por al menos 6 horas del evento anterior o posterior.

En rigor, el factor R utilizado debe ser el promedio de varios años de determinaciones. Así por ejemplo, en todo el territorio de Estados Unidos existen líneas de valores “R”, tal cual las isoyetas, calculadas con al menos 10 años de

datos, de tal manera que cualquier usuario pueda utilizarlas con propiedad, sin necesidad de recurrir a tediosas determinaciones. No obstante, en países en los cuales no existe este tipo de registros debe incurrirse en dichos análisis, altamente consumidores de tiempo y recursos, debiendo muchas veces emplear valores R con solo una o dos temporadas de registros pluviográficos.

A fin de cuantificar con precisión la energía de la lluvia y su intensidad máxima en 30 minutos, se requiere conocer idealmente el detalle de la dinámica horaria de la precipitación en su lapso de duración. Para ello es bastante necesario tener registros de precipitación mediante pluviógrafos (ver figura 2), ya sea de tipo mecánico (utilizando cintas), o bien a través de almacenadores de datos en memorias (loggers).



Se observa un pluviógrafo mecánico automático, en cuya cinta (ver ampliada) se registra la cantidad de agua caída en el evento lluvioso de manera continua. Las marcas las efectúa una aguja con tinta, la cual sube o baja a través de un peso (dependiendo de la cantidad de agua), mientras que la cinta gira mediante un sistema de relojería.

Figura 2: Pluviógrafo y cinta de registro (Predio Pantanillos, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. Fotografías tomadas por Sofía Pino, Ingeniera Forestal).

Los pasos para obtener el factor R por el método tradicional se analizan a continuación:

- Determinar si la lluvia es mayor a 12,7 mm. Para ello es necesario verificar los registros pluviográficos, recordando que se consideran eventos de lluvia distintos a los separados por al menos 6 horas.
- Obtener la intensidad media en milímetros por hora (mm/h), para cada intervalo de igual pendiente existente en la curva pluviográfica de la respectiva tormenta. Un ejemplo se observa en la figura 3.

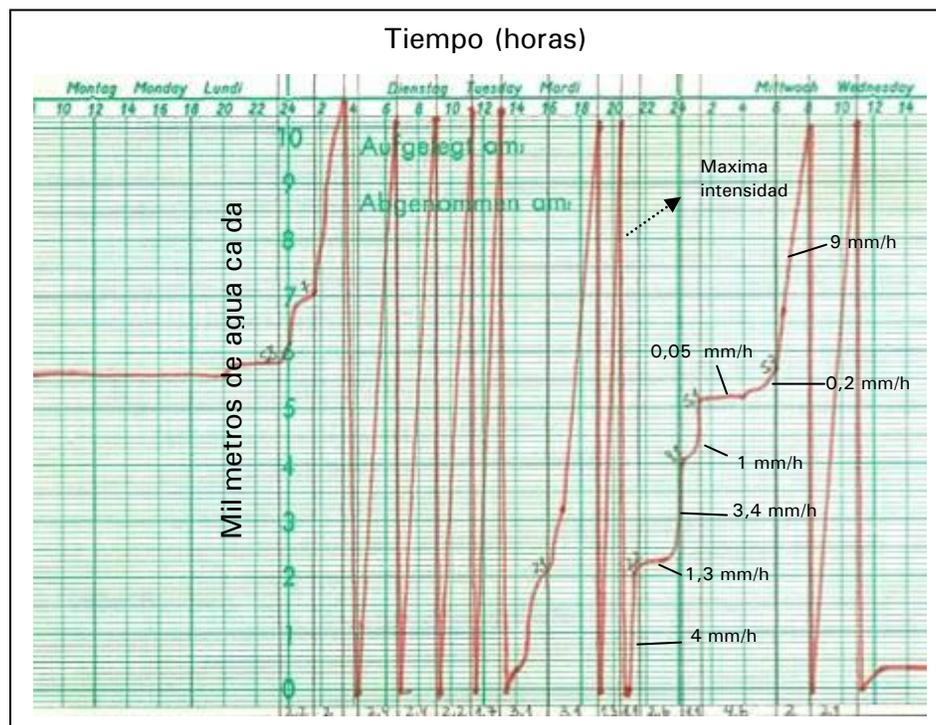


Figura 3: Ejemplo de cinta pluviográfica, en la cual se muestran algunos intervalos que han sido separados debido a sus diferentes intensidades, durante un evento de lluvia.

- c. Para cada intervalo de precipitación fijado, aplicar la fórmula:

$$e = 0,119 + 0,0873 * \log I_M \quad (2)$$

donde  $I_M$  es la intensidad de lluvia medida para el respectivo intervalo y entrega la energía de cada milímetro de agua caída en él. Esta fórmula es válida para intensidades de lluvia menor o iguales a 76 mm/h, y su resultado es en mega-joules por hectárea y milímetro ( $\text{MJ/ha-mm}^{-1}$ ).

Para el caso en que la intensidad del intervalo es superior a 76 mm/h, la energía de un milímetro de agua caída se asume igual a 0,283  $\text{MJ/ha-mm}^{-1}$ .

- d. Calcular la energía total del intervalo, la cual es igual al valor calculado en el paso anterior, multiplicado por el total de milímetros de agua caída en dicho lapso. Es decir:

$$E_i = e_i * pp_i \quad (3)$$

en donde  $E_i$  es la energía total del intervalo “i” del evento de precipitación considerado,  $e_i$  corresponde a la energía por milímetro calculada en el paso anterior para cada intervalo y  $pp_i$  es el total de milímetros de lluvia caídos en el intervalo considerado.

- e. Determinar la energía total de la tormenta ( $E$ ), a través de la suma de las energías calculadas para cada intervalo:

$$E = \sum_1^n E_i \quad (4)$$

- f. Determinar la intensidad máxima en 30 minutos del evento de lluvia considerado ( $I_{30}$ ). Si la cinta pluviográfica está graduada cada una hora puede realizarse una división extra para establecer valores cada media hora. Si la graduación es cada dos horas, tratar de dividir al menos hacia una. Es conveniente, en todo caso, efectuar una apreciación visual inicial de las tendencias pluviográficas, dado que muchas veces los intervalos de mayor intensidad pueden ser detectados así con bastante facilidad (ver figura 3).
- g. Efectuar el producto de la energía total del evento con la intensidad máxima en 30 minutos ( $E \cdot I_{30}$ ), lo cual constituye la erosividad total de la tormenta considerada.
- h. Determinar el factor R, mediante la suma de las respectiva erosividad de cada una de las tormentas anuales superiores a 12,7 milímetros

$$R = \sum_1^n (EI_{30})_j \quad (5)$$

en donde j va de 1 a “n” tormentas producidas en la respectiva temporada.

Debe reiterarse el hecho de que, de disponerse de varios años de registros de cintas pluviográficas, podrá establecerse un factor R promedio, más representativo del sector o área en estudio.

### 2.1.2 MÉTODO ALTERNATIVO

En Chile la disponibilidad de estaciones meteorológicas que cuentan con registros continuos de pluviosidad es bastante escasa. Lo usual es disponer de datos diarios o mensuales, para lo cual existen metodologías complementarias que tienden a buscar la determinación del factor R a partir de dicha información. Estos métodos se basan en el Índice de Fournier (*IF*), el cual emplea para sus cálculos las precipitaciones totales mensuales en la forma:

$$IF = \frac{p^2}{P} \quad (6)$$

en donde  $p$  corresponde a la precipitación del mes más lluvioso (mm) y  $P$  al total anual de agua caída (mm); o bien en el índice modificado de Fournier ( $IMF$ , elaborado por Arnoldus, 1977), que se especifica como:

$$IMF = \sum_1^{12} \frac{p_i^2}{P} \quad (7)$$

con  $p_i$  como la precipitación mensual del mes “ $i$ ”, el cual va de enero a diciembre del correspondiente año. En este contexto, es necesario efectuar ajustes de regresión entre el factor  $R$  calculado por el método USLE y el correspondiente  $IF$  o  $IMF$ . Para ello se requieren al menos 3 años de datos concretos.

No obstante lo anterior, es usual ver que el índice original de Fournier ( $IF$ ) es empleado como un reemplazo directo del factor  $R$  para cálculos en donde la falta de datos es dramática. Debe hacerse notar que la precisión o bondad de la predicción del índice de erosividad  $R$  a través de este método alternativo podría ser discutible para los más puristas. No obstante, esto permite entregar índices comparativos y soluciones bastante prácticas cuando no existen datos suficientes o se requiere una consultoría rápida y económica. Irvem et al. (2007) establecen con claridad que el uso de  $IF$  o  $IMF$  debe ser cuidadoso, ya que su relación con el índice de erosividad  $R$  es variable según el área de estudio. Así, citan a Arnoldus (1977), quien estableció un mapa de índices de erosividad  $R$  para Marruecos (isoerodentas), empleando el  $IMF$  en la forma  $R = 0,264 * IMF^{1,50}$ ; mientras que también mencionan que Renard y Freimund (1994) fijaron similares ecuaciones en las formas  $R = 0,07397 * IMF^{1,847}$  y  $R = 95,77 - 6,081 * F + 0,477 * F^2$  para regiones diferentes.

Rodríguez et al. (2004) emplearon la ecuación genérica del Instituto de Conservación de Recursos Naturales de España (ICONA) para estimar R en la zona de Badajoz, la cual es  $R = 2,56 * IMF^{1,065}$ .

En Chile, Honorato et al. (2001) utilizaron el *IMF* aunque sin describir con claridad la relación matemática, para determinar R en áreas entre la IV y IX Región de Chile. De la misma manera, Gatica (1998) empleó el *IMF* para predecir valores mensuales del factor de erosividad R en la IV Región, a través de la fórmula  $R_i = a + b * IMF_i$ , con valores respectivos de “a” y “b” de 0 y 1, debido a la falta de datos existentes para un mejor ajuste. Aún así, dichos resultados son destacados por Honorato et al. (2001) como buenos.

Por otra parte, Valenzuela y Morales (2004) también emplearon el *IMF* para la determinación del factor de erosividad para la región de Coquimbo, aunque contrastaron como valores R los obtenidos al aplicar las ecuaciones determinadas para zonas equivalentes en España. De esta manera, al ajustar la regresión del tipo  $R = a + b * IMF$ , encontraron que “a” era igual a cero y “b” era equivalente a 1,6881.

En consecuencia, para un cálculo primario del factor de erosividad R y usando los supuestos preliminares de Gatica (1998), se requiere al menos los valores de precipitación mensual.

---

## 2.2 DETERMINACIÓN DEL FACTOR K (ERODABILIDAD DEL SUELO)

---

El factor de erodabilidad del suelo puede ser estimado de manera directa a través de una ecuación, o bien de manera gráfica. Para ambos métodos es necesario, sin embargo, efectuar determinaciones previas de ciertas propiedades que se revisan a continuación:

- Textura. Se determina a través del método de la pipeta, de tal manera de conocer los montos de arena, limo, arcilla y arenas muy finas (entre 0,05 y 0,1 mm de diámetro). De acuerdo a los manuales originales de USLE, para efectos de la erosión del suelo la arena muy fina se comporta similar al limo.
- Materia orgánica. Se estima su proporción porcentual dentro del suelo, para lo cual se efectúa un análisis de Walkley-Black a las muestras obtenidas. Según USLE, el porcentaje de materia orgánica oscila entre 0 y 4%, con valores de números enteros. Si el contenido fijado es más que el rango especificado, se asume un 4%.
- Estructura del suelo. Se efectúa su determinación mediante observación visual y tacto. Para ello es recomendable en un principio, emplear algún manual para comparación. De acuerdo a USLE, las categorías y códigos empleados son sólo cuatro (cuadro 1).

Cuadro 1: Códigos de estructura del suelo de USLE

Código USLE	Tipo de estructura	
1	Granular muy fina	
2	Granular fina	
3	Granular media a gruesa	
4	Bloques	
	Laminar	
	Masiva	

- Permeabilidad del suelo. En USLE, se asignan seis valores o códigos diferentes de acuerdo a la permeabilidad de un suelo determinado (cuadro 2).

Cuadro 2: Códigos USLE de permeabilidad del suelo

Código USLE	Categoría de Permeabilidad
1	Rápida (más de 12,7 cm-h <sup>-1</sup> )
2	Moderada a rápida (6,3 a 12,7 cm-h <sup>-1</sup> )
3	Moderada (entre 2 y 6,3 cm-h <sup>-1</sup> )
4	Lenta a moderada (entre 0,5 y 2 cm-h <sup>-1</sup> )
5	Lenta (entre 0,13 y 0,5 cm-h <sup>-1</sup> )
6	Muy lenta (menor a 0,13 cm-h <sup>-1</sup> )

El factor K en el Sistema Internacional de unidades es expresado en ton-ha-h-ha<sup>-1</sup>-MJ<sup>-1</sup>-cm<sup>-1</sup>, que expresa la resistencia del suelo en superficie y tiempo, respecto a la energía de la lluvia.

### 2.2.1 MÉTODO DE LA ECUACIÓN

Una vez realizado el análisis de textura y determinados los valores o códigos de materia orgánica, estructura y permeabilidad, se está en condiciones de calcular el factor K. Al respecto, se establece en USLE una ecuación para el factor de erodabilidad en la forma:

$$K = 1,313 * [2,1 * 10^{-4} * (12 - MO) * M^{1,14} + 3,25 * (s - 2) + 2,5 * (p - 3)] / (100) \quad (8)$$

en donde *MO* corresponde al porcentaje de materia orgánica del suelo; *s* es el código de la estructura del suelo; *p* es el código de la permeabilidad; y *M* es un factor dado por el producto de la suma de los porcentajes de limo y arena muy fina con la suma de los porcentajes de arena y limo. En términos matemáticos, *M* corresponde a (% limo + arena muy fina)\*(100 - % arcilla).

Cabe señalar que esta ecuación es válida para suelos que tienen 70% o menos de fracción limosa.

### *2.2.2 MÉTODO GRÁFICO*

El método gráfico o nomograma de erodabilidad es la manera más tradicional de estimar el factor K. A pesar de representar la misma ecuación del método anterior, es menos exacto, debido al sesgo visual en que puede incurrir el interesado. En este caso es bueno apoyarse de una regla o algún otro elemento recto de tal forma de minimizar el error. Se emplean dos gráficos conectados, según el esquema presentado en la Figura 4.

La determinación gráfica del factor de erodabilidad se efectúa proyectando siempre líneas rectas en el interior del nomograma. Se comienza ingresando con el porcentaje de limo más arena muy fina en el gráfico izquierdo. A partir de este valor, se proyecta una línea recta hasta interceptar la correspondiente curva representativa del porcentaje de arena del suelo en cuestión. Desde ese punto se proyecta verticalmente la línea hasta topar con la curva que representa el porcentaje de materia orgánica del suelo. Desde allí se continúa hacia la derecha, cruzando la primera aproximación del valor K, la cual es útil si no se dispone de los antecedentes de estructura o permeabilidad. De esta manera, se ingresa al gráfico derecho, continuando la proyección realizada, hasta interceptar la línea correspondiente al código de estructura del suelo en cuestión. Desde ese punto, se desciende por el gráfico hasta topar la línea que representa el código de permeabilidad adecuado al suelo en estudio. Finalmente, desde ese punto se traza la línea recta hacia la izquierda del gráfico, hasta encontrar el factor correspondiente de erodabilidad del suelo (K).



---

### 2.3 DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES TOPOGRÁFICOS L Y S (LONGITUD Y GRADO DE LA PENDIENTE, RESPECTIVAMENTE)

---

La inclusión de los factores topográficos agrega matices importantes en el modelo USLE. En términos simples, el grado de inclinación de un terreno (S) entrega el componente de gravedad necesario para comenzar el movimiento del flujo concentrado y otorgarle velocidad, mientras que la longitud de la pendiente (L) es un factor que condiciona el volumen de agua que fluye en una ladera determinada, y por lo tanto el esfuerzo de corte que el flujo tiene.

Otra variable topográfica de no menor relevancia es la forma de la pendiente. En efecto, la convexidad o concavidad de una ladera puede determinar el aumento de velocidad del flujo concentrado, o bien su reducción y estancamiento. Este tema no está explícitamente expresado en la USLE, sin embargo, a través de la segmentación en trazos menores de similar pendiente se pueden representar pendientes complejas o múltiples, ya sean cóncavas o convexas.

#### 2.3.1 CÁLCULO DE L Y S

Originalmente los factores L y S fueron determinados en conjunto como:

$$LS = (\lambda / 72,6)^m * (65,41 * \sin^2 \alpha + 4,56 * \sin \alpha + 0,065) \quad (9)$$

con  $\lambda$  como la longitud de pendiente en pies,  $\alpha$  el ángulo de pendiente y  $m$  un coeficiente que toma valores de 0,5 (cuando la pendiente  $s > 5\%$ ); 0,4 ( $s$  entre 3,5 y 4,5%); 0,3 ( $s$  entre 1 y 3%) y 0,2 ( $s < 1\%$ ). Al igual que en el caso del factor de erodabilidad, esta fórmula de determinación de  $LS$  fue esquematizada en un gráfico que permite su estimación directa (Figura 5).

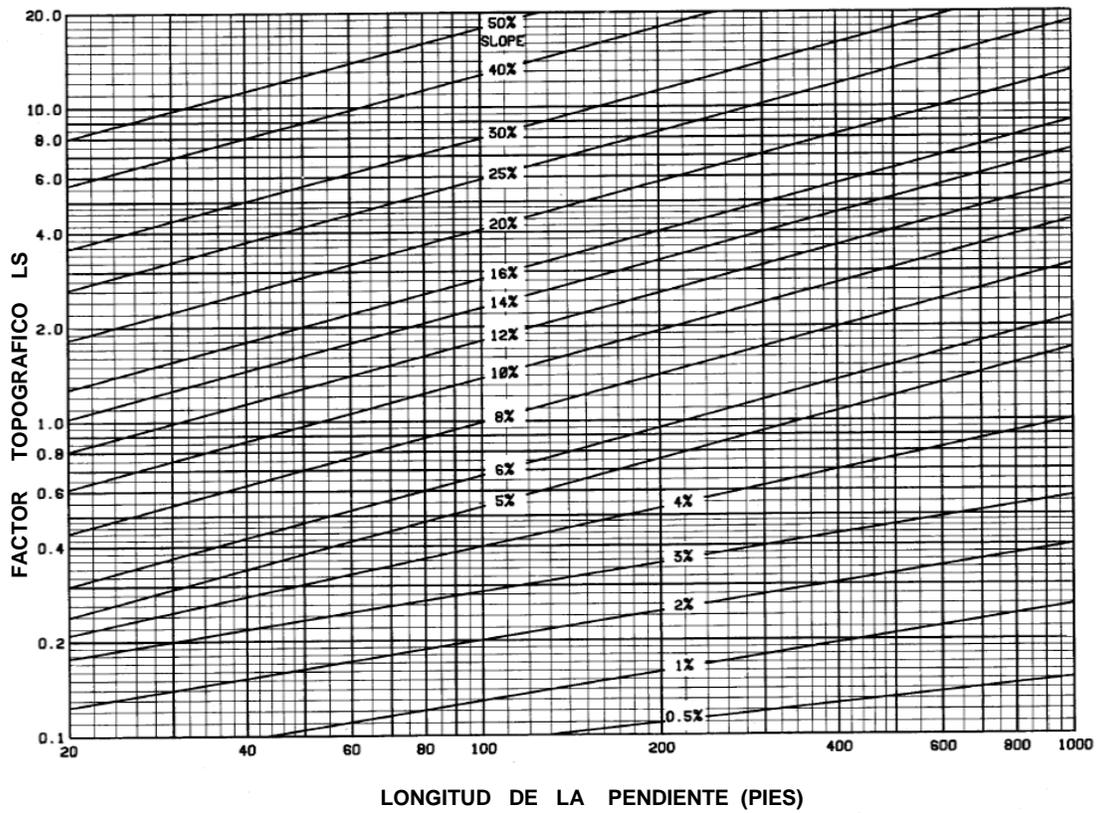


Figura 5: Gráfico o nomograma de determinación del factor combinado LS (adaptado desde Wischmeier y Smith, 1978)

Esta forma de cálculo emplea unidades inglesas, las cuales no son de habitual uso en Chile y la mayor parte de los países. Para eliminar la necesidad de incurrir en transformaciones de unidades, es conveniente utilizar la fórmula para LS descrita por Arnoldus (1977), la cual está dada por:

$$LS = (\gamma / 22,1)^{0,6} * (s / 9)^{1,4} \quad (10)$$

donde  $\gamma$  representa la longitud de la ladera en pendiente (en metros), y  $s$  es el porcentaje de dicha inclinación. Nótese las divisiones por 22,1 y por 9 en dicha

ecuación, lo cual representa las respectivas razones de la ladera considerada sobre la longitud y grado de pendiente de la parcela estándar USLE. Además podrá verificarse, de acuerdo a los exponentes de dicha ecuación, que el grado de inclinación del terreno tendría un peso relativo mayor que la longitud de la ladera.

### *2.3.2 CÁLCULO DE L Y S EN PENDIENTES COMPUESTAS*

Como fue mencionado, la forma de la pendiente es una variable bastante importante que puede ser considerada para los cálculos de erosión de suelos. Una forma de abordar dicho efecto es dividiendo las laderas a considerar en distintos trazos, de tal manera de encontrar una representación promedio de los factores topográficos. Este método permite por consiguiente, incorporar al cálculo de USLE laderas complejas, poco homogéneas en cuanto a la pendiente.

Para determinar LS en laderas de pendientes compuestas se establecen dos supuestos:

- i. Los cambios en la pendiente no son suficientes para implicar deposición.
- ii. La ladera puede ser dividida en segmentos pequeños de igual longitud y de un grado de pendiente interna uniforme.

Los pasos para la determinación de LS, una vez establecidos los segmentos, son:

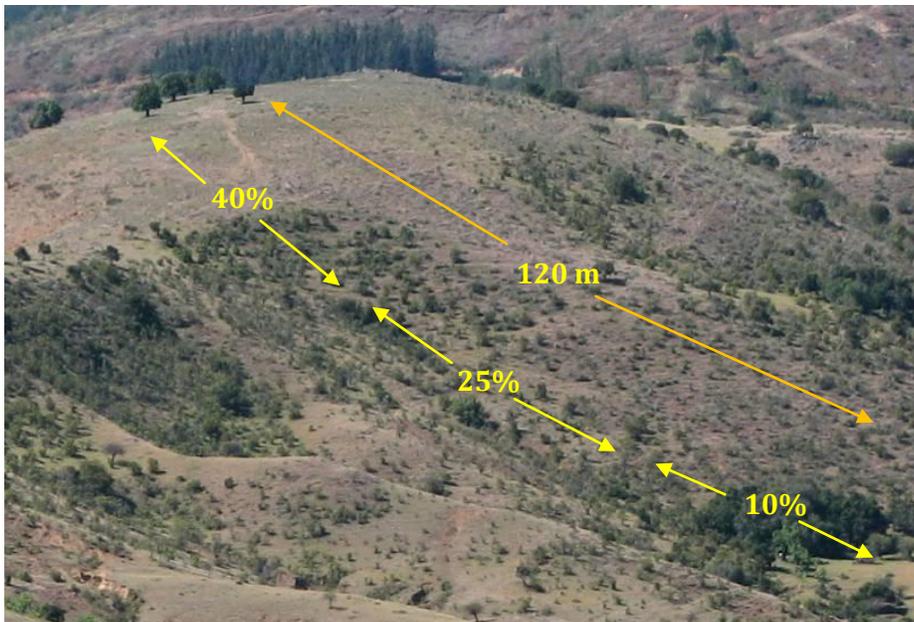
- a. Listar los segmentos desde el extremo superior hacia el inferior.
- b. Utilizar la fórmula o gráfico normalmente, considerando el largo total de la pendiente, pero con grados de inclinación variables según segmento; obtener LS para cada segmento.
- c. Utilizar la siguiente fórmula para determinar la proporción de suelo perdido según segmento:

$$\text{Fracción de pérdida de suelo} = \frac{i^{m+1} - (i-1)^{m+1}}{N^{m+1}} \quad (11)$$

Donde  $i$  es el número secuencial del segmento,  $m$  es el exponente de largo de pendiente, y  $N$  es el número total de segmentos considerados. El valor de  $m$  corresponderá a 0,5 si la pendiente del segmento es mayor o igual a 5%; 0,4 si la pendiente del segmento es 4%; y 0,3 si la inclinación del segmento es menor o igual a 3%.

- d. Multiplicar LS obtenido para cada segmento por la fracción de pérdida de suelo. Sumar los productos.

El usuario es quien debe tomar la decisión acerca de si emplear el método de pendiente irregular, ojalá antes del levantamiento de terreno. De no tener clara la situación, es de todas maneras recomendable efectuar determinaciones de pendiente de la manera más exhaustiva posible, o bien contar con cartografía topográfica de la más alta resolución. Como ejemplo consideraremos la siguiente situación:



La ladera de apariencia cóncava tiene 120 metros de longitud, con un 40% de pendiente en el tercio superior, 25% de pendiente en el tercio medio y un 10% de pendiente en el tercio inferior. Si se dispone sólo de la información de toda la ladera (pendiente media de 25%), el factor LS dado sería de:

$$LS = (120 / 22,1)^{0,6} * (25 / 9)^{1,4} = 11,5$$

Ahora bien, si se dispone de mayor detalle se puede aplicar el método de la pendiente irregular de la siguiente manera:

Segmento	Pendiente (%)	LS	m	Factor de ponderación	LS ponderado
1	40	$LS = (120 / 22,1)^{0,6} * (40 / 9)^{1,4} = 22,3$	0,5	0,19	4,2
2	25	$LS = (120 / 22,1)^{0,6} * (25 / 9)^{1,4} = 11,5$	0,5	0,35	4,0
3	10	$LS = (120 / 22,1)^{0,6} * (10 / 9)^{1,4} = 3,2$	0,5	0,46	1,5
				LS Total =	9,7

Desde el punto de vista de estos resultados, es claro que, en el primer caso (ladera completa con pendiente promedio), se está sobredimensionando el factor topográfico debido a la no consideración de una reducción en el sector más bajo de la pendiente. Esto implica, necesariamente, que el aporte de partículas desde el tercio inferior es muy escaso, lo cual no es tomado en cuenta si se calcula el factor LS sin segmentar. Como resultado, quien aplique USLE estará limitando las opciones productivas de los terrenos y disminuyendo las ganancias potenciales de sus propietarios.

---

## 2.4 DETERMINACIÓN DEL FACTOR C (CUBIERTA VEGETAL Y MANEJO DEL RECURSO)

---

El factor C de USLE representa el grado de protección que un determinado tipo de cubierta vegetal ofrece al suelo, en oposición al resto de las variables que facilitan la erosión hídrica. En otras palabras, en el factor C están representados los efectos del porcentaje de cubrimiento de la vegetación, el efecto protector de los residuos vegetales incluidos en la hojarasca y la acción de agregación que tienen las raíces en el suelo. En sí, el factor C aparece como el más subjetivo, especialmente en materias de índole forestal, puesto que su determinación aúna antecedentes puntuales de investigaciones, más que datos resultantes de una planificación seria y constante. Diferente es el caso de los suelos de aptitud agrícolas, dado que USLE fue establecida primordialmente para este tipo de terrenos y la gran mayoría de los datos y parámetros existentes derivan de ellos. El factor C para cultivos agrícolas incluye los efectos de labores anexas, tales como preparación del sitio, época de siembra y rotaciones usuales para diferentes tipos de clima y suelo.

En general, para determinar el factor C existen tabulaciones y no ecuaciones. Lo anterior radica en el hecho de concentrar los resultados de las diversas parcelas que originalmente se distribuyeron en Estados Unidos para calibrar la ecuación. Como se mencionó, para terrenos agrícolas las tabulaciones para C pueden considerarse más precisas, puesto que poseen mayor número de datos. Al contrario, para sitios forestales las tabulaciones denotan un sesgo importante, que obliga muchas veces a efectuar varios supuestos.

La determinación del factor C para cultivos agrícolas requiere el detalle de todas las labores de la rotación y sus equivalentes de erosividad por período de rotación. Estas respuestas pueden ser entregadas por USLE. En el caso de bosques con manejo, sería entonces igualmente importante poder incorporar el detalle de cobertura, rotación, época del año, cortas intermedias, residuos, etc., todos los

cuales influyen en C. Sin embargo, USLE no es capaz de entregar todas las alternativas para valorar C en dichas circunstancias.

#### 2.4.1 VALORES TABULADOS PARA TERRENOS BOSCOSOS

Originalmente, USLE entrega tabulaciones para valores de C en áreas boscosas de ciertas características: i) terrenos forestales inalterados, ii) terrenos forestales empleados para pastoreo, quemados o cosechados de manera selectiva, y iii), terrenos forestales que han tenido labores de preparación de sitio post-cosecha y están en vías o han sido recientemente restablecidos. Para el primer caso, bosques inalterados, el cuadro 3 muestra los valores tabulados:

Cuadro 3: Valores C para terrenos forestales sin alterar (adaptado de Tabla 11 de Wischmeier y Smith, 1978)

Porcentaje de cobertura de árboles y sotobosque	Porcentaje de cobertura de la hojarasca	Factor C
100 - 75	100 - 90	0,0001 – 0,001
70 - 45	85 - 75	0,002 – 0,004
40 - 20	70 - 40	0,003 – 0,009

Los valores anteriores de C son válidos para áreas boscosas con más de 20% de cobertura arbórea, o bien en situaciones en que el litter es superior a un 40%. Puede observarse los amplios rangos de variación propuestos para C, los cuales, según Wischmeier y Smith (1978), se deben a la variación en porcentajes de litter y en la cobertura y profundidad del dosel arbóreo, pero también denotan la falta de datos ya mencionada de USLE para terrenos forestales. De estudios anexos, se pueden obtener datos relacionados a USLE en situaciones locales. Así por ejemplo, de Mancilla (1995) se puede deducir que el factor C para un bosque de Pino radiata sin intervención, con 23 años de edad y una altura media de 23 metros, 80% de cobertura arbórea y un 100% de cubierta de hojarasca correspondería a 0,0006.

Para el caso de los terrenos forestales pastoreados, quemados o con cosecha selectiva, el empleo de los valores listados en el cuadro 1, bastante bajos en rigor, no es conveniente, puesto que habrá un efecto de degradación de la condición inalterada. En esta situación, la recomendación original de USLE es obtener el factor C desde el cuadro 4.

Cuadro 4: Factor C para praderas permanentes, terrenos baldíos y bosques pastoreados (adaptado de Tabla 10 del manual USLE de Wischmeier y Smith (1978), con correcciones por USDA-ARS)

Cobertura aérea Tipo y altura	% Cobertura aérea	Cubierta superficial en contacto con el terreno						
		% de suelo cubierto						
		Tipo	0	20	40	60	80	95+
No apreciable		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
Herbáceas, pastos largos o matorral con altura media de caída de gotas menor a 0,90 metros	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
Arbustos o matorrales, con altura media de caída de gotas de 1,95 metros	25	G	0,40	0,18	0,09	0,04	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

Cuadro 4 (continuación)								
Árboles, pero sin apreciable cubierta arbustiva o de matorral.	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
Altura media de caída de gotas de 4 metros	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	0,042	0,011
G = Cubierta superficial está compuesta por pasto o material en descomposición; W = la cubierta superficial está compuesta de herbáceas con poca cobertura radicular o residuos no descompuestos.								

Los valores de C obtenidos del cuadro 4 deben ser además ponderados por 0,7, factor que representa el efecto que los aportes de residuos u hojarasca del bosque anterior (o bien actual) han efectuado sobre el suelo. La altura media de caída de gotas no indica la longitud de los árboles, sino que la altura desde la cual caen las gotas tras escurrir por el dosel. En este caso, en las últimas filas del cuadro 4 se podría asumir que el follaje comienza a los 4 metros de altura del árbol. Como ejemplo, es posible relacionar una plantación con raleo al cuadro 4. Los datos de Mancilla (1995) en la Cordillera de Nahuelbuta, en un bosque de Pino radiata de 13 años, con 16 metros de altura media, 43% de cobertura arbórea y 100% de cobertura de residuos, el cual incluía además un sotobosque de roble de 3 años, 3 metros de altura y 60% de cobertura del dosel, permiten deducir un factor C de 0,0007, el cual se inscribe dentro de los rangos indicados por el cuadro 4 en su última categoría.

Para los terrenos forestales que han sido cosechados y, posteriormente, han tenido alguna labor de preparación de sitio para futuro restablecimiento de la plantación, o bien ésta ha sido reciente, USLE recomienda emplear la tabulación mostrada en cuadro 5. Sin embargo, se hace mención a que dichos valores emanaron de datos puntuales y poco abundantes provenientes de bosques sureños de Pináceas de Estados Unidos, por lo cual podrían no funcionar de buena manera en otras condiciones y climas. En áreas con tratamiento de quema post-cosecha ubicadas en el predio Dr. Justo Pastor León (Pantanillos), en la Cordillera de la Costa de la VII

región, Pino (2008) determinó un factor C de 0,262, en terrenos cubiertos en sólo un 5% por algún tipo de cobertura vegetal.

Cuadro 5: Factor C para áreas de bosques alteradas mecánicamente o con métodos de preparación de sitio (adaptada de Tabla 12 del manual USLE, Wischmeier y Smith, 1978)

Preparación del sitio	Cobertura de mulch	Condición del suelo y cobertura de malezas							
		Excelente		Buena		Regular		Pobre	
		NC	WC	NC	WC	NC	WC	NC	WC
Discado, rastrillado o preparado para semillas	0	0,52	0,2	0,72	0,27	0,85	0,32	0,94	0,36
	10	0,33	0,15	0,46	0,20	0,54	0,24	0,60	0,26
	20	0,24	0,12	0,34	0,17	0,40	0,20	0,44	0,22
	40	0,17	0,11	0,23	0,14	0,27	0,17	0,30	0,19
	60	0,11	0,08	0,15	0,11	0,18	0,14	0,20	0,15
	80	0,05	0,04	0,07	0,06	0,09	0,08	0,10	0,09
Quemas	0	0,25	0,10	0,26	0,10	0,31	0,12	0,45	0,17
	10	0,23	0,10	0,24	0,10	0,26	0,11	0,36	0,16
	20	0,19	0,10	0,19	0,10	0,21	0,11	0,27	0,14
	40	0,14	0,09	0,14	0,09	0,15	0,09	0,17	0,11
	60	0,08	0,06	0,09	0,07	0,10	0,08	0,11	0,08
	80	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,06	0,05
Trituración de residuos	0	0,16	0,07	0,17	0,07	0,20	0,08	0,29	0,11
	10	0,15	0,07	0,16	0,07	0,17	0,08	0,23	0,10
	20	0,12	0,06	0,12	0,06	0,14	0,07	0,18	0,09
	40	0,09	0,06	0,09	0,06	0,10	0,06	0,11	0,07
	60	0,06	0,05	0,06	0,05	0,07	0,05	0,07	0,05
	80	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04

NC = Sin vegetación viva ; WC = Con un 75% de pasto y malezas, implicando una altura media de goteo de 1,27 m.

#### *2.4.2 FACTOR C POR EL MÉTODO DE LOS SUB-FACTORES*

La complejidad de los sistemas boscosos obligó al Servicio Forestal de Estados Unidos, dependiente del Departamento de Agricultura (USDA Forest Service), a tratar de representar más fielmente la determinación del factor C en ecosistemas forestales. Es por ello que se elaboró la “Guía para la predicción de erosión laminar y concentrada en terrenos forestales”, por parte de Dissmeyer y Foster (1984). En dicho documento se establece que el factor C en terrenos forestales puede ser obtenido evaluando una serie de nueve sub-factores, los cuales son:

- Proporción de suelo desnudo
- Cubierta del dosel
- Reconsolidación del suelo
- Alto contenido orgánico
- Raíces finas
- Efecto de enlace residual
- Almacenamiento in-situ
- Secuencia de saltos en el terreno
- Labranza en contorno, el cual es más bien determinado con el factor P de prácticas de conservación de suelos, a revisar más adelante en este documento.

El factor C absoluto es el producto de esos nueve sub-factores. Sin embargo, el usuario debe evaluar si todos los sub-factores son aplicables a una determinada situación o no. A continuación se hará una revisión de cada sub-factor, para posteriormente avanzar hacia la estimación de su valor.

*a. Sub-factor de proporción de suelo desnudo*

En general, se considera que desechos vegetales y rocas protegen al suelo contra los agentes de erosión hídrica y favorecen indirectamente la condición de una mayor capacidad de infiltración del suelo. A condiciones similares de suelo desnudo menor al 100%, la erosión será siempre menor en los suelos bajo bosques. Esto se debe a que en suelos agrícolas, especialmente bajo cultivos, la falta de cobertura vegetal es continua, por lo cual el escurrimiento puede generarse y alcanzar mayor velocidad y esfuerzo de corte. En terrenos boscosos, las zonas sin cobertura corresponden por lo general a áreas sin conexión, hecho que impide la continuidad del flujo de escorrentía que podría generarse en ellos y favorece la infiltración.

*b. Sub-factor de la cubierta del dosel*

Este sub-factor considera el efecto del dosel de las diversas cubiertas vegetales, en su acción de interceptar el agua de lluvia. El agua podrá posteriormente evaporarse, o bien alcanzar de todas maneras el piso a través de escurrimiento fustal o goteo. El efecto del goteo puede, incluso, ser más perjudicial que el impacto de la lluvia, puesto que las gotas formadas en el follaje y ramas de árboles pueden alcanzar gran tamaño y, por ende, una velocidad de caída considerable. Es necesario enfatizar que este sub-factor debe aplicarse sólo a los sitios desnudos bajo la cubierta de dosel, puesto que donde existen residuos sobre el suelo se emplea el sub-factor de la proporción del suelo desnudo, ya revisado con anterioridad. Se especifica la siguiente tabulación para el sub-factor:

Cuadro 6: Valores para el sub-factor de la cubierta del dosel (adaptado de Dissmeyer y Foster, 1984)

Altura del dosel (m)	Porcentaje de suelo desnudo cubierto por algún dosel										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0,5	1,00	0,91	0,83	0,74	0,66	0,58	0,49	0,41	0,32	0,24	0,16
1,0	1,00	0,93	0,86	0,79	0,72	0,65	0,58	0,51	0,44	0,37	0,30
2,0	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
4,0	1,00	0,97	0,95	0,92	0,90	0,87	0,84	0,82	0,79	0,76	0,74
6,0	1,00	0,98	0,97	0,96	0,94	0,93	0,92	0,90	0,89	0,87	0,85
8,0	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92
16,0	1,00	1,00	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96
20,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

*c. Sub-factor de reconsolidación del suelo*

Un suelo que ha sido labrado o intervenido en general, tiende a disminuir su erodabilidad con el tiempo, lo cual se denomina reconsolidación del suelo. Al respecto, Dissmeyer y Foster (1984) señalan que las experiencias indican que la máxima reducción en erodabilidad sería de un 45%, lo cual ocurriría a partir del séptimo año sin labranza. Es por ello que se estima como 0,45 el valor mínimo de este sub-factor, aumentando de acuerdo a las temporadas desde el último laboreo en el suelo.

*d. Sub-factor del alto contenido orgánico*

Si se revisan las condiciones de cálculo del factor K de erodabilidad del suelo, se recordará que el contenido de materia orgánica tiene un límite máximo de 4%, es decir, aunque sea mayor se asume como 4%. El sub-factor del alto contenido orgánico pretende entonces subsanar ese sesgo, usando un valor de 0,7 sólo en los casos donde, aparte de que el contenido orgánico sea mayor a 4%, tenga también

una profundidad de 2,5 centímetros en el perfil del suelo. Si no cumple con dichas características, el valor de este sub-factor es 1.

*e. Sub-factor de raíces finas*

Este sub-factor tiene como finalidad representar el efecto protector que las raíces finas tienen en el suelo, especialmente en los primeros 5 centímetros del perfil edáfico. Se hace notar que la red de raíces finas cumple su función protectora aún después que la cubierta vegetal ha sido removida, manteniendo el suelo en su lugar y repeliendo las fuerzas erosivas de la gota de lluvia y la escorrentía superficial. Para evaluar este factor se requiere bastante observación de la porción desnuda del suelo. No obstante, si la maquinaria ha removido los primeros centímetros de suelo, ya sea por arado, subsolado u otra técnica, entonces este sub-factor toma el valor 1. Dissmeyer y Foster (1984) señalan como una guía para estimar este sub-factor, efectuar micro-parcelas de  $\frac{1}{4}$  de pulgadas cuadradas de área (1,61 cm<sup>2</sup>), en las cuales las raíces finas deben estar presentes en cada una de dichas micro-parcelas, sin exclusión. De lo contrario, el sub-factor toma el valor 1.

*f. Sub-factor del efecto de enlace residual*

Cuando hay un cambio de uso del suelo, y éste es intervenido, la historia previa del sitio tiene efectos sobre la erodabilidad del lugar. Esto es, si dicho terreno estaba previamente cubierto por vegetación, tendrá una erosión reducida al principio, aumentando posteriormente si continúa en su nueva condición de labranza. Este efecto se debe a la buena estructuración del suelo, ya que aún existen efectos de agregación de partículas edáficas por parte de las raíces y la materia orgánica remanentes. Se distinguen 4 situaciones referidas a este sub-factor:

- El suelo superficial tiene una buena red de raíces finas, mientras que el sub-suelo tiene buena estructura y permeabilidad.

- El suelo superficial tiene una red de raíces finas muy pobre, mientras que el sub-suelo tiene buena estructura y permeabilidad.
- Se ha perdido el suelo superficial, pero existe una red de raíces finas muy pobre, mientras que el sub-suelo tiene buena estructura y permeabilidad.
- Se ha perdido el suelo superficial, pero existe una red de raíces finas muy pobre, mientras que el sub-suelo tiene una pobre estructura y permeabilidad.

*g. Sub-factor de almacenamiento in-situ*

Las partículas de suelo que son removidas no necesariamente serán transportadas hacia el final de la cuenca o liberadas en el curso de agua de desagüe. En efecto, muchas partículas serán depositadas o retenidas en cavidades, depresiones u obstáculos ubicados en la ladera. El sub-factor de almacenamiento in-situ evalúa este efecto, para lo cual existen algunos valores refrendados por Dissmeyer y Foster (1984). No obstante, se recomienda observar cuidadosamente la presencia de depresiones u obstáculos en terreno y su cercanía a los puntos en que se produce erosión. El cuadro 7 entrega valores para este sub-factor.

Cuadro 7: Valores para el sub-factor de almacenamiento in-situ, en el cual las características enunciadas son sistemáticamente continuas espacialmente (adaptado de Dissmeyer y Foster, 1984)

Situación	Valor de sub-factor
Ladera sin depresiones, plana en superficie	1,0
Almacenamiento entre agregados de suelo de 2,5 cm de diámetro	0,9
Almacenamiento entre agregados de suelo de 5,0 cm de diámetro	0,8
Almacenamiento entre agregados de suelo de 10 cm de diámetro	0,7
Almacenamiento entre agregados de suelo de 15 cm de diámetro	0,5
Almacenamiento en huellas de tractor ubicadas en contra de la pendiente principal	0,8
Almacenamiento en cavidades dejados por tocones o por la marca de un aspa de arado	0,8
Almacenamiento en represas creadas por residuos vegetales o trozos de fuste o ramas, ubicados en contra de la pendiente principal	0,8
Almacenamiento en sectores arados o excavados en contra de la pendiente principal, con poco suelo desnudo y más hojarasca, hendiduras de 15 cm	0 – 0,2
Almacenamiento en sectores arados o trabajados con hendiduras de 2,5 cm, en contra de la pendiente principal, con suelo desnudo en áreas entre hendiduras.	0,8
Almacenamiento en sectores arados a favor de la pendiente principal	0,9

#### *h. Sub-factor de la secuencia de saltos en el terreno*

Los saltos corresponden a la estructura tipo peldaño que se forma en el terreno por diversos factores, tales como el efecto acumulador de partículas de suelo que tienen residuos vegetales, rocas, tocones u otros obstáculos en el terreno, el paso de ciertas maquinarias, etc. Estos peldaños o saltos tienen la particularidad de reducir la pendiente en sus secciones horizontales (figura 6), y se consideran no sistemáticos, sino que distribuidos al azar. Es por ello que no se cuentan acá los saltos ocasionados por maquinaria de labranza agrícola usual, tales como arados. Para evaluar este sub-factor debe primero estimarse la proporción de terreno que

posee saltos y luego aplicar la fórmula para pendientes irregulares, como fue descrito en la sección 2.3.2., considerando factores C para cada segmento. No obstante, se entrega el siguiente cuadro con valores para este sub-factor.

Cuadro 8: Valores para el sub-factor de la secuencia de saltos en el terreno (adaptado de Dissmeyer y Foster, 1984)

Pendiente (%)	Porcentaje de la ladera con estructura de saltos										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
5	1,00	0,99	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,94	0,93	0,92
6	1,00	0,97	0,94	0,92	0,89	0,86	0,84	0,81	0,78	0,76	0,73
7	1,00	0,96	0,92	0,88	0,84	0,80	0,75	0,71	0,67	0,63	0,59
8	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,69	0,64	0,59	0,54	0,49
9	1,00	0,94	0,89	0,83	0,77	0,71	0,65	0,60	0,54	0,48	0,42
10	1,00	0,94	0,87	0,81	0,75	0,68	0,62	0,56	0,49	0,43	0,36
12	1,00	0,93	0,85	0,78	0,71	0,63	0,56	0,49	0,42	0,34	0,27
15	1,00	0,92	0,84	0,75	0,67	0,59	0,51	0,43	0,34	0,26	0,18
20	1,00	0,91	0,82	0,74	0,65	0,56	0,47	0,38	0,29	0,20	0,11
30 y más	1,00	0,91	0,81	0,72	0,63	0,53	0,44	0,35	0,25	0,15	0,06

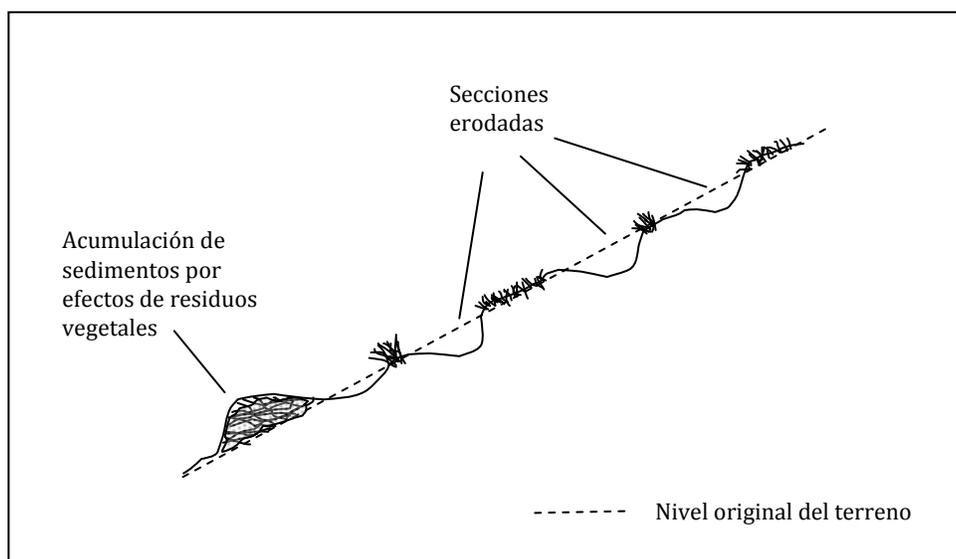


Figura 6: Ilustración de la secuencia de saltos en terreno. La menor pendiente que existe en los topes de los peldaños redonda en una disminución de la velocidad de la escorrentía.

*i. Sub-factor de labranza en contorno*

Este sub-factor pretende evaluar el efecto que ocasionaría el labrado mediante arado o subsolado en el terreno forestal. Esto es positivo si se efectúa en contorno (siguiendo la curva de nivel), puesto que reduce la escorrentía superficial respecto a una ladera sin labranza. En ese caso, conviene evaluar el proceso a través del factor P de USLE. No obstante, si el labrado es angulado respecto de la curva de nivel, el efecto varía y es necesario evaluarlo de manera diferente. Se entrega el siguiente cuadro para seleccionar el valor adecuado para este sub-factor.

Cuadro 9: Valores para el sub-factor de labranza en contorno (adaptado de Dissmeyer y Foster, 1984)

Pendiente (%)	Siguiendo la curva de nivel	Grados de desviación respecto a la curva de nivel				
		15	30	45	60	90
0-2	0,80	0,88	0,91	0,94	0,96	1,00
3-7	0,70	0,82	0,87	0,91	0,94	1,00
8-12	0,80	0,88	0,91	0,94	0,96	1,00
13-18	0,90	0,94	0,96	0,97	0,98	1,00
19 y más	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

### 2.4.2.1 Evaluación de los sub-factores

Para determinar cada uno de los sub-factores es necesario considerar dos situaciones: suelos forestales a los cuales se les hizo algún tipo de labranza (subsulado por ejemplo) y suelos forestales a los cuales no se les hizo labranza o preparación alguna.

#### *i. Tabulaciones especiales para suelos forestales no labrados*

Corresponde a la situación más común en los suelos forestales. A este respecto, se ha desarrollado una tabulación que combina algunos de los sub-factores y permite determinar los valores respectivos (cuadro 10).

Cuadro 10: Valores para el efecto combinado de los sub-factores de proporción de suelo desnudo, raíces finas y reconsolidación del suelo en suelos forestales sin labranza (adaptación de Dissmeyer y Foster, 1984).

% Suelo desnudo	Porcentaje de suelo desnudo con una densa red de raíces finas en los primeros tres centímetros de suelo										
	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
0	,0000										
1	,0004	,0004	,0005	,0006	,0007	,0008	,0010	,0012	,0014	,0016	,0018
2	,0008	,0008	,0010	,0012	,0014	,0017	,0020	,0023	,0027	,0031	,0036
5	,0030	,0030	,0030	,0040	,0050	,0060	,0070	,0080	,0090	,0110	,0120
10	,0050	,0050	,0060	,0080	,0090	,0110	,0130	,0150	,0170	,0200	,0230
20	,0110	,0120	,0140	,0170	,0200	,0240	,0280	,0330	,0380	,0440	,0500
30	,0170	,0180	,0200	,0250	,0290	,0360	,0420	,0500	,0590	,0680	,0770
40	,0230	,0240	,0270	,0340	,0420	,0490	,0580	,0680	,0790	,0920	,1040
50	,0300	,0320	,0380	,0450	,0540	,0640	,0740	,0880	,1030	,1180	,1350
60	,0370	,0380	,0430	,0550	,0670	,0790	,0920	,1090	,1270	,1470	,1670
70	,0470	,0490	,0540	,0680	,0830	,0980	,1170	,1380	,1610	,1870	,2120
80	,0550	,0580	,0660	,0810	,0980	,1180	,1410	,1640	,1920	,2210	,2520
85	,0660	,0690	,0780	,0950	,1150	,1380	,1650	,1950	,2280	,2640	,3000
90	,0750	,0800	,0890	,1110	,1330	,1570	,1870	,2220	,2600	,3010	,3420
95	,0860	,0900	,1020	,1250	,1550	,1820	,2170	,2550	,2980	,3450	,3920
100	,0990	,1040	,1170	,1440	,1800	,2070	,2480	,2930	,3420	,3960	,4500

*ii. Tabulaciones especiales para suelos forestales labrados*

Al igual que en el caso anterior, en terrenos de uso forestal existirían efectos combinados de algunos sub-factores, como también existe una tabla especial para el sub-factor de raíces finas. En el caso de los sub-factores combinados, las tabulaciones difieren de acuerdo a las categorías revisadas en el sub-factor de efecto de enlace residual.

Cuadro 11a. Valores para el efecto combinado de porcentaje de suelo desnudo, reconsolidación del suelo y enlace residual en suelos forestales labrados. Situación de suelo superficial con una buena red de raíces finas y sub-suelo con buena estructura y permeabilidad (adaptado desde Dissmeyer y Foster, 1984).

% Suelo desnudo	Tiempo desde la labranza (meses)			
	0	6	12 o más de 72	más de 24 y hasta 60
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1	0,0014	0,0017	0,0018	0,0020
2	0,0029	0,0033	0,0036	0,0041
5	0,0090	0,0110	0,0120	0,0130
10	0,0190	0,0220	0,0230	0,0260
20	0,0370	0,0450	0,0490	0,0560
30	0,0590	0,0680	0,0740	0,0840
40	0,0830	0,0950	0,1040	0,1170
50	0,1080	0,1240	0,1360	0,1530
60	0,1370	0,1570	0,1720	0,1940
70	0,1690	0,1940	0,2120	0,2400
80	0,2120	0,2440	0,2670	0,3010
85	0,2410	0,2770	0,3030	0,3420
90	0,2740	0,3150	0,3440	0,3880
95	0,3130	0,3600	0,3930	0,4440
100	0,3600	0,4140	0,4500	0,5100

Cuadro 11b. Valores para el efecto combinado de porcentaje de suelo desnudo, reconsolidación del suelo y enlace residual en suelos forestales labrados. Situación de suelo superficial con una red de raíces finas muy pobre y sub-suelo con buena estructura y permeabilidad (adaptado desde Dissmeyer y Foster, 1984).

% Suelo desnudo	Tiempo desde la labranza (meses)					
	0	6	12 a 36	48	60	72 y más
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1	0,0021	0,0023	0,0025	0,0022	0,0020	0,0018
2	0,0042	0,0047	0,0050	0,0045	0,0040	0,0036
5	0,0140	0,0150	0,0160	0,0150	0,0130	0,0117
10	0,0270	0,0310	0,0330	0,0290	0,0260	0,0230
20	0,0580	0,0650	0,0690	0,0600	0,0540	0,0490
30	0,0870	0,0980	0,1030	0,0920	0,0820	0,0740
40	0,1220	0,1350	0,1440	0,1290	0,1150	0,1040
50	0,1590	0,1760	0,1880	0,1670	0,1500	0,1350
60	0,2010	0,2240	0,2390	0,2130	0,1900	0,1710
70	0,2490	0,2770	0,2960	0,2630	0,2350	0,2120
80	0,3130	0,3480	0,3520	0,3300	0,2950	0,2660
90	0,4030	0,4480	0,4790	0,4260	0,3800	0,3420
95	0,4610	0,5130	0,5480	0,4870	0,4350	0,3920
100	0,5300	0,5900	0,6300	0,5600	0,5000	0,4500

Cuadro 11c. Valores para el efecto combinado de porcentaje de suelo desnudo, reconsolidación del suelo y enlace residual en suelos forestales labrados. Situación en que se ha perdido el suelo superficial pero existe una red de raíces finas muy pobre, y el sub-suelo tiene buena estructura y permeabilidad (adaptado desde Dissmeyer y Foster, 1984).

% Suelo desnudo	Tiempo desde la labranza (meses)							
	0	6	12	24	36	48	60	72 y más
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1	0,0028	0,0029	0,0030	0,0029	0,0026	0,0022	0,0020	0,0018
2	0,0056	0,0058	0,0059	0,0057	0,0052	0,0045	0,0040	0,0036
5	0,0180	0,0190	0,0190	0,0180	0,0170	0,0150	0,0130	0,0120
10	0,0360	0,0380	0,0380	0,0370	0,0340	0,0290	0,0260	0,0230
20	0,0760	0,0790	0,0800	0,0770	0,0700	0,0600	0,0540	0,0490
30	0,1150	0,1200	0,1210	0,1160	0,1070	0,0920	0,0860	0,0740
40	0,1610	0,1690	0,1700	0,1630	0,1500	0,1290	0,1150	0,1040
50	0,2100	0,2200	0,2220	0,2130	0,1950	0,1680	0,1500	0,1350
60	0,2660	0,2790	0,2810	0,2700	0,2470	0,2130	0,1900	0,1710
70	0,3290	0,3450	0,3470	0,3340	0,3060	0,2630	0,2350	0,2120
80	0,4130	0,4320	0,4360	0,4190	0,3840	0,3300	0,2950	0,2660
85	0,4690	0,4910	0,4950	0,4760	0,4360	0,3750	0,3350	0,3020
90	0,5320	0,5570	0,5620	0,5400	0,4940	0,4260	0,3800	0,3420
95	0,6090	0,6380	0,6430	0,6180	0,5660	0,4870	0,4350	0,3920
100	0,7000	0,7330	0,7390	0,7100	0,6500	0,5600	0,5000	0,4500

Cuadro 11d. Valores para el efecto combinado de porcentaje de suelo desnudo, reconsolidación del suelo y enlace residual en suelos forestales labrados. Situación en que se ha perdido el suelo superficial pero existe una red de raíces finas muy pobre, y el sub-suelo tiene una pobre estructura y permeabilidad (adaptado desde Dissmeyer y Foster, 1984).

% Suelo desnudo	Tiempo desde la labranza (meses)							
	0	6	12	24	36	48	60	72 y más
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1	0,0032	0,0033	0,0033	0,0030	0,0026	0,0022	0,0020	0,0018
2	0,0064	0,0066	0,0065	0,0059	0,0052	0,0045	0,0040	0,0036
5	0,0210	0,0220	0,0210	0,0190	0,0170	0,0150	0,0130	0,0120
10	0,0420	0,0430	0,0430	0,0380	0,0340	0,0290	0,0260	0,0230
20	0,0860	0,0890	0,0880	0,0800	0,0700	0,0600	0,0540	0,0490
30	0,1310	0,1360	0,1340	0,1220	0,1070	0,0920	0,0840	0,0740
40	0,1840	0,1900	0,1880	0,1700	0,1500	0,1290	0,1150	0,1040
50	0,2400	0,2480	0,2450	0,2220	0,1950	0,1680	0,1500	0,1350
60	0,3040	0,3140	0,3110	0,2810	0,2470	0,2130	0,1900	0,1710
70	0,3760	0,3890	0,3840	0,3480	0,3060	0,2630	0,2350	0,2120
80	0,4720	0,4880	0,4830	0,4370	0,3840	0,3300	0,2950	0,2660
85	0,5360	0,5540	0,5480	0,4960	0,4360	0,3750	0,3350	0,3020
90	0,6080	0,6290	0,6220	0,5620	0,4940	0,4260	0,3800	0,3420
95	0,6960	0,7190	0,7120	0,6440	0,5660	0,4870	0,4350	0,3920
100	0,8000	0,8270	0,8180	0,7400	0,6500	0,5600	0,5000	0,4500

Cuadro 12: Valores para el sub-factor de raíces finas, para el caso de plantas invasoras en terrenos forestales labrados (adaptado de Dissmeyer y Foster, 1984).

% Suelo desnudo con raíces finas	Valor sub-factor
0	1,00
10	0,87
20	0,76
30	0,65
40	0,56
50	0,47
60	0,40
70	0,34
80	0,28
90	0,24
100	0,22

#### 2.4.2.2 Ejemplos de cálculo de C mediante sub-factores

i. Se ha talado un bosque en un terreno de 12% de pendiente. No ha habido laboreo de suelo posterior. Se ha estimado en un 20% la superficie de suelo desnudo remanente, de lo cual un 30% tiene vegetación de un metro de altura de dosel sobre él. Todo el suelo desnudo tiene una red de raíces finas. El suelo superficial tiene un alto contenido de materia orgánica, de 7,5 pulgadas de espesor. Existe un 20% de la ladera que posee un microrrelieve de saltos. Existen residuos y trozos regularmente ubicados perpendicularmente a la pendiente principal. Calcular C.

Los valores para cada sub-factor, sus respectivas fuentes y ubicación en ellas, constan a continuación:

Sub-factor	Valor asignado	Fuente empleada	Ubicación en cuadro respectivo
Suelo desnudo y raíces finas	0,011	Cuadro 10	Sexta fila, primera columna
Cubierta del dosel	0,86	Cuadro 6	Segunda fila, tercera columna
Saltos	0,85	Cuadro 8	Séptima fila, tercera columna
Almacenamiento in-situ	0,8	Cuadro 7	Octava fila
Alto contenido orgánico	0,7	Sección 2.4.2, letra d	

En este caso de suelo sin labranza (lo más común en sitios forestales), no se evalúa el sub-factor de reconsolidación del suelo, laboreo en contorno ni de enlace residual, como tampoco se debe emplear el cuadro 12 de raíces finas de plantas invasoras.

El valor final para C será entonces:  $0,011 \times 0,86 \times 0,85 \times 0,80 \times 0,70 = \mathbf{0,0045}$

Veamos el mismo caso, pero con labranza de suelo posterior que alcanza ya 6 meses y que ha extraído los residuos:

*ii. Se ha labrado un terreno de 12% de pendiente hace seis meses. Se ha estimado en un 20% la superficie de suelo desnudo, de lo cual un 30% tiene vegetación de un metro de altura de dosel sobre él. El suelo superficial tiene una buena red de raíces finas y un alto contenido de materia orgánica, de 7,5 pulgadas de espesor. El sub-suelo tiene buena permeabilidad y estructura. Se ha establecido vegetación invasora en un 50% del suelo desnudo. La mitad de las nuevas raíces son laterales. El suelo ha sido labrado en cerca de 15° respecto a las curvas de nivel. Calcular C.*

Los valores para cada sub-factor, sus respectivas fuentes y ubicación en ellas, constan a continuación:

Sub-factor	Valor asignado	Fuente empleada	Ubicación en cuadro respectivo
Suelo desnudo, enlace residual y reconsolidación del suelo	0,045	Cuadro 11a	Sexta fila, segunda columna
Cubierta del dosel	0,86	Cuadro 6	Segunda fila, tercera columna
Vegetación invasora	0,47	Cuadro 12	Sexta fila, única columna
Labranza en contorno	0,88	Cuadro 9	Tercera fila, segunda columna

Como se notará en este caso de suelo con labranza, no se evalúa el sub-factor de saltos (puesto que los residuos y restos de trozos han sido removidos),

almacenamiento in-situ (misma razón, dado que hay desfase respecto a la curva de nivel), y alto contenido orgánico (fue removido).

El valor final para C será entonces:  $0,045 \times 0,86 \times 0,47 \times 0,88 = \mathbf{0,016}$

#### *2.4.3 ¿CÓMO DISCERNIR DE CUÁNDO USAR UN VALOR C DIRECTO O EMPLEAR SUB-FACTORES?*

Esta pregunta tiene una lógica respuesta. Es el nivel de detalle de la información recabada el que faculta para emplear uno u otro método estimador del factor C, pero también la pertinencia. Así, en los ejemplos revisados en el punto anterior (2.4.2.2), los datos permitieron emplear sub-factores. En otros casos, podrán usarse los cuadros 3, 4 o 5 según corresponda, los cuales demandan menos detalles de información. No obstante, en la divulgación del método de los sub-factores, Dissmeyer y Foster (1984) señalan que dicho sistema reemplaza a las situaciones en donde normalmente se emplearían los valores de los cuadros 3 y 5.

El método de los sub-factores responde a una necesidad de ajustar más fielmente las condiciones de los terrenos forestales. En rigor, sus resultados debiesen ser más aproximados a lo real. Sin embargo, los valores que aparecen en sus respectivas tabulaciones responden en general a un reducido número de datos experimentales, los cuales podrían no ajustarse a la realidad de diversos sistemas forestales, ya que responden a estudios efectuados en parcelas y cuencas de los estados de Tennessee, Carolina del Norte, Carolina del Sur y Mississippi.

Por otra parte, precisar la pertinencia de emplear uno u otro método es decisión del profesional o técnico a cargo del estudio y del mandante, toda vez que la mayor demanda de datos e información de terreno redundará también en un incremento de los costos.

#### *2.4.4 VALORES TABULADOS PARA SITIOS DE CONSTRUCCIÓN*

En los casos en que se aplican técnicas para reducir los impactos de las gotas de lluvia y de la escorrentía superficial en sitios de construcción, es necesario evaluar la efectividad de las alternativas propuestas o empleadas. Para ello también puede utilizarse USLE, ya que dispone de algunos valores para el factor C con coberturas artificiales. Esto es útil, por ejemplo, cuando se trabaja en control de taludes o en asesorías para parques u otros centros recreativos, en los cuales puede solicitarse la competencia profesional de un ingeniero forestal o un experto afín. En este contexto, el cuadro 13 entrega algunos de los valores para el factor C y que son aplicables en áreas de construcción según se ha referido, haciendo la salvedad de que no hay cobertura vegetal alguna y que se debe ser sensato al interpolar o extrapolar valores.

Cuadro 13: Valores para el factor C de cubierta y manejo en áreas de construcción (adaptado desde Wischmeier y Smith, 1978)

Tipo de mulch	Cantidad aplicada (ton-ha <sup>-1</sup> )	Pendiente (%)	C	Máxima longitud de pendiente (m)
Ninguno	0	todas	1	-
Paja o heno fijados al terreno por algún sistema de anclaje*	2,2	1 - 5	0,20	61
		6 - 10	0,20	30
	3,4	1 - 5	0,12	91
		6 - 10	0,12	46
	4,5	1 - 5	0,06	122
		6 - 10	0,06	61
		11 - 15	0,07	46
		16 - 20	0,11	30
		21 - 25	0,14	23
		26 - 33	0,17	15
Rocas partidas de 0,6 a 4 centímetros de tamaño (longitud)	303	Menor a 16	0,05	61
		16 - 20	0,05	46
		21 - 33	0,05	30
		34 - 50	0,05	23
	538	Menor que 21	0,02	91
		21 - 33	0,02	61
Astillas de madera	16	Menor que 16	0,08	23
		16 - 20	0,08	15
	27	Menor que 16	0,05	46
		16 - 20	0,05	30
		21 - 33	0,05	23
	56	Menor que 16	0,02	61
		16 - 20	0,02	46
		21 - 33	0,02	30
		34 - 50	0,02	23

\* Si no se aplica sistema de anclaje y el terreno tiene un factor de erodabilidad K superior a 0,30, entonces los valores de C deben ser el doble de lo descrito en este cuadro.

---

## **2.5 DETERMINACIÓN DEL FACTOR P (PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN)**

---

Muchas veces la presencia de vegetación no evita la producción de escurrimiento superficial. En este sentido, el empleo de prácticas de conservación en el suelo minimiza el efecto del flujo de agua. Al respecto, USLE incluye el factor P de prácticas de conservación para tres situaciones:

- El empleo de labranza siguiendo las curvas de nivel (cultivo en contorno)
- El empleo de fajas de cultivo en contorno
- El empleo de terrazas

El cultivo en contorno es tal vez lo más aplicable al sector forestal, dado que las plantaciones se establecen siguiendo en general las curvas de nivel. Su efectividad, en todo caso, disminuye con el mayor grado de pendiente del terreno y también con la mayor longitud de la ladera en cuestión. Por el contrario, su efecto protector es mayor si los residuos de la cosecha anterior se apilan en el sentido de las curvas de nivel. Los valores de P para esta condición constan en cuadro 14.

Cuadro 14: Factor P de prácticas de conservación (adaptado desde las Tablas 13 a 15 del manual USLE, Wischmeier y Smith, 1978)

Pendiente (%)	Cultivo en contorno o curvas de nivel		P para cultivo en terrazas
	P*	Longitud máxima de ladera (m)	
1 - 2	0,60	122	0,12
3 - 5	0,50	91	0,10
6 - 8	0,50	61	0,10
9 - 12	0,60	37	0,12
13 - 16	0,70	24	0,14
17 - 20	0,80	18	0,16
21 - 25	0,90	15	0,18

\* Se pondera por 0,8 si considera contornos realizados con pilas de residuos

El empleo de fajas de cultivos en contorno consiste en el establecimiento de fajas del cultivo de interés intercaladas con otras de residuos o pastos. Este sistema no es empleado en cultivos forestales, por lo cual no será mayormente tratado en este documento.

El uso de terrazas es también efectuado de manera preferente en los cultivos agrícolas, sin embargo se ha extendido, aunque aún de forma incipiente, a los sistemas de producción forestal. A este respecto, el cuadro 14 entrega una sección de los valores de P para terrenos forestales, en el caso hipotético del establecimiento de terrazas y plantación en curvas de nivel sobre ellas.

## EMPLEO PRÁCTICO DE LA USLE

---

En este punto se revisarán ejemplos prácticos de la utilización de la USLE en el campo forestal. Si bien estos casos pueden servir de guía al lector acerca de cómo proceder en algunas situaciones determinadas, no debe perderse de vista los diferentes matices factibles de encontrar en el terreno forestal, los cuales pueden hacer variar el análisis a realizar.

En el caso de desarrollarse un estudio que incluya el análisis de riesgos de erosión en terrenos forestales, es conveniente planificar con bastante antelación el empleo de USLE. Esto se debe a la alta cantidad y complejidad de los parámetros requeridos, los cuales es necesario conocer en claridad cómo, cuándo y dónde se obtendrán, agregando el costo que ello involucra. Contrastando dicho análisis con el presupuesto dispuesto para estos efectos, podrá haber una decisión acerca del nivel de detalle con el que se actuará.

Por otra parte, si a un consultor se le solicita evaluar el riesgo o la condición actual de erosión con datos ya tomados, la situación es aún más compleja. Bajo esta premisa la experiencia del consultor es muy importante, como también lo es su capacidad para relacionar los antecedentes con escenarios similares encontrados en su desarrollo profesional o en la bibliografía específica. Al respecto, conviene recordar que el límite de acción es la condición ética y profesional de no caer en excesivo simplismo ni en falsas hipótesis para efectuar el trabajo encomendado.

---

### 3.1 PROBLEMAS RESUELTOS

---

Se conjugan acá algunos ejemplos publicados por el autor en la revista Ambiente Forestal (números 2 y 3, año 2007) y otros inéditos.

- a. *A fin de habilitar terrenos para cultivos agrícolas, se pretende talar una ladera cubierta de bosque nativo. El bosque cubre un 90% de la superficie del terreno, la ladera tiene una pendiente media de 20% y su longitud son 120 metros. El suelo es franco (arcilla 35%, limo 30%), las arenas finas corresponden aproximadamente a un 7%, la materia orgánica es un 4%, la estructura es granular y la permeabilidad del terreno es buena. Estudios de pluviografía indican que el factor R de erosividad en el área sería alrededor de 220 MJ-cm-ha<sup>-1</sup>-hr<sup>-1</sup>. Se pretende quemar los rastrojos de la tala. En este caso, interesa conocer cuánto suelo podría perderse por erosión hídrica tras la cosecha de bosque. Una pérdida superior a 50 ton-ha<sup>-1</sup>-año<sup>-1</sup> ocasionaría que el cultivo agrícola posterior no sería viable económicamente, sin considerar los perjuicios ambientales ocasionados por la erosión.*

#### **Respuesta:**

Al momento, sólo el factor de erosividad de la lluvia es conocido (220 MJ-cm-ha<sup>-1</sup>-hr<sup>-1</sup>). El factor de erodabilidad del suelo es obtenido según la ecuación 8:

$$K = 1,313 * [2,1 * 10^{-4} * (12-MO) * M^{1,14} + 3,25 * (e-2) + 2,5 * (p-3)] / (100)$$

Recordando que M = (% limo + arena muy fina) \* (100 - % de arcilla); MO es el porcentaje de materia orgánica del suelo; 'e' el código de estructura del suelo, 3 para este ejemplo; y 'p' el código de permeabilidad del suelo, 2 para este ejemplo.

Reemplazando los valores correspondientes, K resulta ser igual a 0,168 ton-ha-ha<sup>-1</sup>-MJ<sup>-1</sup>-cm<sup>-1</sup>.

Por otra parte, los factores de pendiente (S) y su longitud (L), se agrupan en el factor topográfico LS, que es calculado mediante la ecuación 10:

$$LS = (\gamma / 22,1)^{0,6} * (s / 9)^{1,4}$$

con 'γ' como la longitud de pendiente, y 's' el porcentaje de la pendiente. Aplicando los antecedentes respectivos, LS resulta ser 8,44. A su vez, el factor C de cubierta y manejo de la vegetación es obtenido a través de las tabulaciones que para estos efectos tiene USLE. Normalmente, cuando se habilitan terrenos agrícolas, el terreno queda desnudo y sin residuos, extrayéndose además los tocones y raíces. Esto deja el suelo en una condición de absoluta desprotección ante la lluvia y la escorrentía, por lo tanto el factor C se aproximaría al máximo, es decir toma el valor 1. Asimismo, el factor P tomaría el valor 1, dado que no se pretende realizar práctica de conservación alguna. En consecuencia, la estimación de pérdida de suelo anual para la situación descrita corresponde a:

$$A = 220 * 0,168 * 8,44 * 1 * 1 = 311,94 \text{ ton-ha}^{-1}\text{-año}^{-1}$$

De esta manera, la tala del bosque ocasionaría un daño ambiental considerable, que involucraría una fuerte pérdida de nutrientes. Esto haría que el eventual cultivo agrícola tuviese un rendimiento bastante pobre e irrelevante. Esta práctica, debería quedar entonces circunscrita a áreas de muy baja pendiente, de preferencia inferiores a 5%.

En otra circunstancia, para conocer el nivel de erosión de previo a la cosecha, simplemente debe modificarse el factor C. En este caso, se utilizaría el valor 0,001, según cuadro 3. Esto daría un valor de pérdida de suelo calculado como:

$$A = 220 * 0,168 * 8,44 * 0,001 * 1 = 0,31 \text{ ton-ha}^{-1}\text{-año}^{-1}$$

Lo cual demuestra claramente el efecto del bosque en reducir la efectividad de los agentes erosivos para degradar el suelo.

b. *En similar situación a la anterior, se pretende manejar productivamente el bosque. Las estimaciones señalan que la extracción de un área basal de entre 50 y 70% podría ser rentable, siempre y cuando no implique daños por erosión superiores a 15 ton-ha<sup>-1</sup>- año<sup>-1</sup>. A fin de facilitar la regeneración del bosque, se podría sugerir ordenar los residuos mediante algún sistema.*

**Respuesta:**

En este caso existen varias alternativas de elección a ser consideradas, ya sea variando el porcentaje de área basal, manejando la vegetación, o bien organizando los residuos. La ecuación se re-organiza entonces como:

$$\begin{aligned} A &= R * K * L * S * C * P \\ &\downarrow \\ C * P &= A / (R * K * L * S) \\ &\downarrow \\ C * P &\leq 15 / (220 * 0,168 * 8,44) \\ &\downarrow \\ C * P &\leq 0,048 \end{aligned}$$

Por consiguiente, la combinación de los factores C y P debe ser igual o inferior a 0,048.

Cuando el bosque nativo ya ha sido intervenido, puede ser apropiado (dependiendo de los datos con que se cuente) utilizar el cuadro 4 para determinar el factor C. En este caso, se asume que la cubierta en contacto directo con el terreno estaría principalmente compuesta por residuos no descompuestos que cubrirían aún un 90% del terreno (sin considerar todavía la probable reorganización de residuos para facilitar la regeneración del bosque). Como supuesto adicional, se asume que el porcentaje remanente de área basal en el bosque corresponde también al porcentaje de cobertura arbórea dejado en pie. También se considera que el goteo

de la lluvia interceptada por la vegetación arbórea ocurre desde unos 4 metros. Los factores C corresponden a:

- Cobertura remanente de 30%,  $C = 0,032$
- Cobertura remanente de 50%,  $C = 0,032$

Esto implicaría que:

$$\begin{aligned} C * P < 15 / (220 * 0,168 * 8,44) \\ \downarrow \\ P < 15 / (220 * 0,168 * 8,44 * 0,032) \\ \downarrow \\ P < 1,5 \end{aligned}$$

es decir P debe ser menor a 1,5, lo cual es posible dado que el máximo valor que toma P es igual a 1. El resultado anterior significa que si el residuo se mantiene diseminado en el terreno, sin organizarlo, la cosecha forestal podría incluso abarcar hasta un 70% del área basal. Sin embargo, dicha conclusión podría variar si se emplea la sugerencia de redistribuir los residuos para facilitar la regeneración arbórea. En ese nuevo escenario, el factor P de prácticas de conservación sería modificado, pero también el factor C debería determinarse de una forma alternativa, dado que el cuadro 4 no puede aplicarse cuando existe una alteración de la cubierta que está en contacto directo con el terreno. En estas circunstancias, resulta conveniente utilizar una combinación de los cuadros 4 y 5, este último correspondiente a una adaptación de la Tabla 12 del manual USLE de Wischmeier y Smith (1978).

Suponiendo que los residuos se agruparán principalmente bajo la vegetación arbórea remanente, entonces, dependiendo del área basal extraída, quedaría entre un 50 y un 70% del terreno con poco residuo. Se considera además que los residuos

se extraen o trasladan mediante maquinaria, con un efecto similar al que causa el paso de un rastrillo. El suelo, al estar anteriormente bajo bosque, quedaría en una excelente condición ante los agentes erosivos. Ante este contexto, las combinaciones posibles del factor C serían:

Sector con cobertura arbórea remanente (con residuos)			Sector sin cobertura arbórea remanente y poco residuo			Factor C compuesto (C1 x proporción del área total) + (C2 x {1-proporción del área total})
% cobertura arbórea remanente	Proporción del área total	Factor C1*	% cobertura arbórea remanente	1-(Proporción del área total)	Factor C2**	
30	0,3	0,011	0	0,7	0,24	0,171
40	0,4	0,011	0	0,6	0,24	0,148
50	0,5	0,011	0	0,5	0,24	0,126

\* obtenido mediante uso de cuadro 4.  
 \*\* obtenido mediante uso de cuadro 5, con 20% de residuo remanente.

Lo anterior implicaría que, a fin de tener 15 ton-ha<sup>-1</sup>-año<sup>-1</sup> como la máxima pérdida de suelos, los valores del factor P de prácticas de conservación deberían ser:

- Para 30% de cobertura remanente:  $P < 15 / (220 * 0,168 * 8,44 * 0,171)$ , es decir,  $P < 0,281$ .
- Para 40% de cobertura remanente:  $P < 15 / (220 * 0,168 * 8,44 * 0,148)$ , es decir,  $P < 0,325$ .
- Para 50% de cobertura remanente:  $P < 15 / (220 * 0,168 * 8,44 * 0,126)$ , es decir,  $P < 0,382$ .

La estimación de los valores del factor P puede efectuarse examinando el cuadro 14. Allí, los valores tabulados de P indican que, de acuerdo a lo requerido, la acción preferente sería la realización de terrazas, actividad alejada de la actividad forestal usual, especialmente en bosque nativo.

Una alternativa diferente consiste en extraer el área basal sugerida mediante el método selectivo y apilar los residuos de las áreas cosechadas en franjas en sentido de las curvas de nivel, a la vez que los residuos bajo los árboles remanentes o no intervenidos se mantienen. Esto resultaría en:

R	K	LS	C			P*	A		
			30% cobertura	40% cobertura	50% cobertura		30% cobertura	40% cobertura	50% cobertura
220	0,168	8,44	0,171	0,148	0,126	0,64	34,14	29,55	25,16
* en cuadro 13 resulta del valor 0,8 para pendientes de 17 a 20%, ponderado por 0,8 por ser las franjas en contorno efectuadas con residuos.									

Sin embargo, los montos de pérdidas de suelo estimados aún son excesivos para lo requerido.

De acuerdo a lo sugerido en el cuadro 14, la cosecha con una disposición de franjas en curvas de nivel, para una pendiente de 20%, requeriría franjas alternadas de 20 metros de ancho. Como ejemplo, analizamos la extracción de 70% de área basal bajo esta modalidad:

Franja con vegetación remanente. Extracción del 40% del área basal. Residuos quedan en el lugar					
R	K	LS (20% pendiente, 20 metros longitud)	C	P	A (ton-ha <sup>-1</sup> - año <sup>-1</sup> )
220	0,168	2,88	0,032	1	3,41
Franja sin vegetación. Extracción del 100% del área basal. Residuos se apilan en curvas de nivel					
R	K	LS (20% pendiente, 20 metros longitud)	C	P	A (ton-ha <sup>-1</sup> - año <sup>-1</sup> )
220	0,168	2,88	0,24	0,64	16,35

La opción anterior reviste cierto riesgo, debido a la cantidad superior a 16 ton-ha<sup>-1</sup>-año<sup>-1</sup>. No obstante, debe apuntarse que la magnitud del flujo de escorrentía superficial sería ampliamente disipada por las franjas de vegetación, lo que aseguraría las metas esperadas (ver evidencias en Brooks et al., 1997). Este hecho no cambiaría si se extrae sólo el 50% del área basal, debido a que no afectaría a las franjas sin vegetación.

En consecuencia, la mejor alternativa sería realizar la tala en franjas de 20 metros, o bien dejar un mayor monto de residuos remanentes en las franjas de extracción.

c. Una plantación de Pino radiata de 23 años será sometida a tala rasa con quema de desechos. La plantación se ubica en una ladera de 100 metros de longitud y 30% de pendiente. Al pie de esta ladera existe un terreno con vegetación no mayor de 4 metros de altura, densa, de unos 30 metros de longitud y un 5% de pendiente, y que colinda con un curso de agua que sirve de regadío aguas abajo. Hay evidencias de pastoreo en esta sección. Se quiere conocer en cuánto aumentaría el aporte de sedimentos al río si se cosecha la totalidad de la plantación. El suelo es franco limoso (30% arcilla, 30% arena y 40% limo, con un 1% de arenas muy finas), materia orgánica es de un 3% en la plantación y un 5% en la sección contigua al río; la permeabilidad es moderada y la estructura es de bloques subangulares. El factor de erosividad R se ha estimado en  $180 \text{ MJ-cm-ha}^{-1}\text{-hr}^{-1}$ .

**Respuesta:**

En este caso se deberá emplear el concepto de pendiente compuesta, considerando los dos segmentos, puesto que el aporte extra de sedimentos al curso de agua será la erosión que sale desde el sector colindante (pendiente de 5%), y que previamente recibe el sedimento transportado desde la ladera superior (donde se ubica la plantación de pino radiata). Al respecto, se espera que la cantidad de sedimentos erodados desde la plantación disminuya fuertemente en la sección inferior, producto del efecto buffer de la vegetación nativa.

Veamos primero cuál sería la erosión actual. Los valores para los parámetros de la ecuación del factor de erodabilidad K (ecuación 8), resultan ser:

Sección	MO	M	e	p	<b>K</b>
Plantación	3	2870	4	3	<b>2,26</b>
Pie de ladera	4	2870	4	3	<b>2,02</b>

Por su parte, el factor C requiere de cierto análisis. Para la sección superior con la plantación, se asume que las copas están cerradas o a punto de serlo, por lo cual se utiliza el cuadro 3, primera fila, en donde, con criterio conservador, se escoge C igual a 0,001. Cabe señalar que, en este caso, se estima que los probables raleos precedentes ya fueron solapados por el aumento de cobertura de los individuos remanentes. A su vez, en la sección inferior, se asume que la altura media de caída de gotas desde los árboles y arbustos es de 1,95 metros y que existen residuos en descomposición y pastos de amplia distribución, por lo cual mediante cuadro 4, C es igual a 0,003.

No hay prácticas de conservación asociadas, por lo cual P es igual a 1.

Segmento	Pendiente (%)	LS	m	Factor de ponderación	LS ponderado
1	30	$LS = (100/22,1)^{0,6} * (30/9)^{1,4} = 13,35$	0,5	0,35	4,7
2	5	$LS = (30/22,1)^{0,6} * (5/9)^{1,4} = 0,53$	0,5	0,65	0,3
LS Total =					5,0

Mediante el método de las pendientes compuestas, los valores respectivos finales para los parámetros o factores son:

Sección	Valores preliminares			m	Factor ponderador	Valores finales			Producto
	K	LS	C			K	LS	C	
1	2,26	13,35	0,001	0,5	0,35	0,79	4,67	0,00035	0,0013
2	2,02	0,53	0,003	0,5	0,65	1,313	0,34	0,002	0,0009
Total									0,0022

Y la pérdida de suelos estimada es entonces,

R (MJ-cm-ha <sup>-1</sup> -hr <sup>-1</sup> )	Suma de K*LS*C (ton-ha-h-ha <sup>-1</sup> -MJ <sup>-1</sup> -cm <sup>-1</sup> )	P	Pérdida de suelos (ton-ha <sup>-1</sup> -año <sup>-1</sup> )
180	0,0022	1	<b>0,40</b>

El monto calculado es bastante menor, dentro de cualquier rango tolerable.

Veamos ahora el caso tras la tala rasa. De partida, los factores R, L, S y P no sufren modificación. El efecto de la quema podría afectar la materia orgánica del suelo y, por lo tanto, variar el factor de erodabilidad. No obstante, no hay mayores datos al respecto, por lo cual se prefiere mantener los mismos valores de K. Entonces, el único cambio sería el factor C de la sección superior, la cual sufrirá la tala rasa con quema de desechos. En este caso, claramente, debe emplearse el cuadro 5, asumiendo que no ha quedado vegetación, el suelo ha sido fuertemente afectado y el mulch desaparece, en cuyo caso el valor de C sería 0,45, bastante superior al existente cuando existía el bosque. Así, el cálculo de factores sería:

Sección	Valores preliminares			m	Factor ponderador	Valores finales			Producto
	K	LS	C			K	LS	C	
1	2,26	13,35	0,45	0,5	0,35	0,79	4,67	0,158	0,583
2	2,02	0,53	0,003	0,5	0,65	1,313	0,34	0,002	0,0009
Total									0,584

Y el suelo que va hacia el curso de agua es:

R (MJ-cm-ha <sup>-1</sup> -hr <sup>-1</sup> )	Suma de K*LS*C (ton-ha-h-ha <sup>-1</sup> -MJ <sup>-1</sup> -cm <sup>-1</sup> )	P	Pérdida de suelos (ton-ha <sup>-1</sup> -año <sup>-1</sup> )
180	0,584	1	<b>105,12</b>

El resultado es bastante superior, puesto que la cantidad de sedimentos que irían hacia el curso de agua aumentaría en cerca de 105 toneladas anuales, cantidad muy por sobre cualquier límite tolerable y, con seguridad, causante de un daño irreversible en los cursos de agua naturales.

---

### 3.2 PROBLEMAS A RESOLVER

---

- a. Estimar la erodabilidad de un suelo franco, con un 3% de materia orgánica.
- b. Se le solicita determinar la fragilidad de dos suelos. Uno de ellos se establece sobre una pendiente de un 20% y tiene 20% de arcilla, 30% de limo y 50% de arena, con un 4% de arenas muy finas, estructura granular gruesa, buena permeabilidad; el otro suelo se establece sobre una pendiente de un 15%, tiene un 10% de arcilla, un 50% de limo y un 40% de arena, y un 3% de arenas muy finas; su permeabilidad es buena y su estructura es granular media. ¿Cuál de estos suelos es más frágil en términos de erosión?
- c. Se establecerá un camino sobre un terreno rural. Para ello, se ha establecido que los taludes laterales tendrán una pendiente de  $45^\circ$ . Los taludes tendrán una longitud de 20 metros. Dado el reducido presupuesto, no se cuenta con la alternativa de cementar los taludes, por lo cual se requiere de alguna otra técnica para controlar la erosión. Se estima que el monto tolerable de movimiento de suelo es de 1 tonelada por hectárea en cada año. El suelo subyacente en el talud es franco (35% arena, 35% limo y 30% arcilla, con 4% de arenas muy finas). Se conoce también que la erosividad de la lluvia en la zona es de unos  $210 \text{ MJ-cm-ha}^{-1}\text{-hr}^{-1}$ . Recomendar con fundamentos y si es posible, alguna técnica para el control de taludes.
- d. Se pretende aplicar cortas de protección a un bosque siempreverde, para lo cual se piensa en extraer un área basal no menor a un 40%. Muy cerca del sector a intervenir circula un río, por lo cual se estima que, para no afectar este recurso, la máxima erosión probable del sector son  $3 \text{ ton-ha}^{-1}\text{-año}^{-1}$ . Se pretende extraer los residuos en el área cosechada para acelerar la regeneración, pero se dejarán en el lugar tocones y raíces. En promedio, los árboles tienen una altura de 25 metros y sus copas comienzan a los 10 metros de altura. La cobertura del bosque es de 100%. El terreno es en general bastante regular, con una pendiente de un 30% y una longitud de la

ladera estimada en 100 metros. El suelo tiene un 40% de arcilla, un 30% de limo y un 30% de arena, con un 8% de materia orgánica y un 2% de arenas muy finas. Su estructura es granular media y su permeabilidad es moderadamente buena. Se estima una erosividad de  $380 \text{ MJ-cm-ha}^{-1}\text{-hr}^{-1}$ . ¿Cuál será la máxima área basal posible de extraer en el bosque a fin de no afectar el río?

---

# REFERENCIAS

---

- Arnoldus, H., 1977. Predicting soil losses due to sheet and rill erosion. *En: Fao Conservation Guide N° 1: Guidelines for watershed management*, pág. 99-123.
- Brooks, K., Ffolliott, P., Gregersen, H., y DeBano, L., 1997. Hydrology and the management of watersheds, Second Edition. United States of America: Iowa State University Press, 502 pp.
- Dissmeyer, G. and Foster, G., 1984. A guide for predicting sheet and rill erosion on forest land. USDA Forest Service. R8-TP 6.
- Gatica, V., 1998. Validación de un modelo de simulación para procesos erosivos en la IV Región. Memoria de Título Ingeniería Forestal, Universidad de Chile. 79 p.
- Honorato, R., Barrales, L., Peña, I. y Barrera, F., 2001. Evaluación del modelo USLE en la estimación de la erosión en seis localidades entre la IV y IX Región de Chile. *Ciencia e Investigación Agraria*, 28(1): 7 – 14.
- Irvem, A., Topaloglu, F., y Uygur, V., 2007. Estimating spatial distribution of soil loss over Seyhan river basin in Turkey. *Journal of Hydrology*, 336: 30 - 37.
- Mancilla, G., 1995. Erosión bajo cubiertas vegetales en la Cordillera de Nahuelbuta (VIII Región). Tesis Ingeniería Forestal, Departamento de Silvicultura, Universidad de Chile, 177 p.
- Mancilla, G., 2007. “El uso de modelos de erosión para la planificación de actividades forestales” partes I y II. *Revista Ambiente Forestal* (números 2 y 3).

Pino, S., 2008. Estimación de pérdidas de suelo en tres situaciones de manejo de residuos post-cosecha, usando el modelo RUSLE, en el predio Pantanillos, VII Región. Tesis Ingeniería Forestal, Departamento de Silvicultura, Universidad de Chile. 49 p.

Renard, K.G., Freimund, J.R., 1994. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157: 287 - 306.

Rodríguez, M., Florentino, A., Gallardo J. y García, R., 2004. Sistemas de Información Geográfica en la evaluación de la erosión hídrica en Badajoz – España, aplicando la metodología USLE. *Agronomía Tropical*, 54(4): 391 – 409.

Valenzuela, B. y Morales, L., 2004. Estimación del factor de erosividad de las precipitaciones en la región de Coquimbo. Actas XIV Simposio de la Sociedad Chilena de Física (SOCHIFI'04), 17 al 19 de Noviembre, Antofagasta, Chile.

Wischmeier, W., y Smith, D., 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. United States Department of Agriculture, Agriculture handbook N° 537. 58 p.