

LA CARACTERIZACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL AGUA EN LADERAS, COMO INSTRUMENTO DE ZONIFICACIÓN DE LOS USOS DEL SUELO EN CUENCAS DE MONTAÑA

RICARDO GARCÍA-DÍAZ*, JUAN ANGEL MINTEGUI* Y JOSÉ CARLOS ROBREDO*

RESUMEN

En el presente artículo se intentará definir unos criterios de estabilidad, enfocados al aprovechamiento sostenido de las áreas de montaña, apoyándose en el comportamiento del movimiento del agua en sus laderas, bajo diferentes pendientes y con distintos tipos de cubiertas vegetales. El estudio también contempla, junto al análisis hidráulico del flujo en las laderas, las tensiones críticas transmitidas por las láminas de escurrido al terreno; capaces de iniciar la formación de regueros en el mismo.

Finalmente, se comenta la importancia del bosque de montaña bien formado, como protector del suelo ante las escorrentías generadas por los aguaceros en sus vertientes.

Palabras clave: criterios de estabilidad; movimiento del agua; pendientes; cubiertas vegetales; tensiones críticas; procesos erosivos; bosque de montaña.

SUMMARY

Characterising water movement on slopes as a zoning method for landuse in mountains basins.

This paper defines several stability criteria of sustainable use of mountain areas, studying the water movement down mountain slopes of different gradients and with different types of vegetation cover.

The paper also considers, together with a hydraulic analysis of the water flow down the slopes, the critical shear run-off, which could create incipient water fissures down the mountain sides.

Finally, it deals with the importance of an established mountain forest, as a soil protector against the erosion caused by downpours on the mountain slopes.

Key words: stability criteria; water movement; slopes; vegetation cover; critical shear; erosion processes; mountain forest.

*Unidad de Hidráulica e Hidrología. Departamento de Ingeniería Forestal. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. - 28040 MADRID. e-mail: jmintegui@montes.upm.es

Recibido: 02.10.2001

Aceptado: 12.07.2002

INTRODUCCIÓN: OBJETIVOS DE LOS ENSAYOS PRESENTADOS.

El movimiento de una lámina de agua en régimen libre, permanente y uniforme, se estudia normalmente referido a un cauce determinado, con calados de cierta entidad y pendientes moderadas. En tales circunstancias, la ecuación más utilizada para establecer su velocidad probablemente sea la aportada por R. MANNING; puesto que el coeficiente de rugosidad n , utilizado en la misma, resulta conocido para un número muy elevado de diferentes tipos de contornos sobre los que tiene lugar el movimiento.

La ecuación de R. MANNING adopta la expresión:

$$v = \frac{R^{2/3} \cdot j^{1/2}}{n}$$

donde:

- v , es la velocidad de la corriente, en el caso que se analiza de la lámina de agua, en m/s.
- R , el radio hidráulico, en m, que para cauces de gran anchura en relación con un calado se identifica con este último.
- j , la pendiente del cauce o ladera, en m/m.
- n , el coeficiente de rugosidad, conocido también como número de MANNING, que establece la resistencia que presenta la rugosidad del lecho al avance de la lámina de agua.

Como se ha comentado, la ecuación de MANNING tiene su mejor adaptación en cauces abiertos en régimen turbulento (es decir, con números de REYNOLDS superiores a 2000), con contornos bien definidos en los que el calado se manifiesta con claridad, disminuyendo el valor del coeficiente de rugosidad conforme aumenta el calado de la corriente (V. T. CHOW).

La ecuación de MANNING tiene la misma estructura que la ecuación universal de DARCY-WEISBACH, ya que ambas establecen

el carácter cuadrático de la velocidad respecto del gradiente hidráulico o pérdida de carga unitaria de la corriente; pero mientras el coeficiente de rugosidad f de DARCY-WEISBACH ha sido exhaustivamente estudiado y definido para conducciones cerradas, el coeficiente de rugosidad de MANNING lo ha sido para cauces abiertos; por ello en la práctica sustituye a la ecuación universal en las circunstancias que se comentan

Realmente en las laderas de las cuencas de montaña: donde las pendientes son por lo general elevadas, los calados de la lámina de escurrido muy reducidos, en la práctica resulta casi imposible precisar el cauce del escurrimiento y la rugosidad que ofrece la solera es elevada, estando lógicamente condicionada a la vegetación que la cubre, siempre que ésta exista, no se dan aparentemente las circunstancias clásicas u óptimas para la aplicación de la ecuación de MANNING; pero analizando el problema desde el punto de vista hidráulico, los fenómenos que tienen lugar están claramente definidos dentro del rango de su aplicabilidad. Así lo han considerado los diferentes autores que se comentan a lo largo del presente artículo y así se ha operado en los ensayos que se analizan en el mismo

Dichos ensayos se orientaron a mejorar el conocimiento de los movimientos del agua en las laderas; para lo que se trató de cuantificar los parámetros hidráulicos más significativos de los mismos; en especial el referido al coeficiente de rugosidad de los lechos sobre los que se desplazan las láminas de agua; pero también se consideraron las tensiones críticas de iniciación de la erosión en regueros generados por dichas láminas.

El objetivo final de los ensayos ha sido el tratar de cuantificar el comportamiento del agua de escorrentía en las diferentes unidades de la cuenca, establecidas mediante los factores pendiente, vegetación y tipos de suelos (aunque en el presente documento no se haya considerado el suelo, por realizarse todos los ensayos en el mismo lugar, en general se le debe tener en cuenta), para de este modo mejorar los criterios

de actuación; tanto en el ámbito de posteriores temas de investigación, como puede ser el desarrollo experimental de algunos modelos distribuidos; como en el más práctico de la ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente, como fase previa a los trabajos y obras de corrección hidrológico-forestal de la misma.

Las investigaciones se iniciaron operando en el canal del laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de la U.P.M., con el propósito de ir adquiriendo experiencia para los trabajos posteriores, planificados sobre las propias laderas en el campo. Estas últimas operaciones se efectuaron utilizando unos canales itinerantes, diseñados y construidos al efecto, que se instalaron directamente en las laderas objeto de los ensayos.

Los ensayos se realizaron entre 1993-94, aunque sus resultados no se dieron a conocer de inmediato; pues al tratarse de un número reducido de pruebas, se consideró que era necesario contrastarlos con los obtenidos por otros inves-

tigadores que habían trabajado en procesos físicos similares. Sin embargo, tras una búsqueda bibliográfica exhaustiva, que ha abarcado el período comprendido entre 1949-99, estudiando las investigaciones llevadas a cabo en la materia en cuestión por diversos autores de procedencias muy diversas; se llegó a la conclusión que la magnitud de sus resultados se mantenía en el mismo rango, que los obtenidos en los ensayos que se describen en este artículo; por lo que se consideró interesante publicarlos, juntamente con la metodología empleada para conseguirlos.

MATERIALES Y MÉTODO UTILIZADOS EN LAS OPERACIONES DE CAMPO

Materiales: Dispositivos utilizados en los ensayos

Para operar directamente sobre las laderas, se construyó un canal itinerante de campo, como el que se muestra en la Figura 1 en funciona-

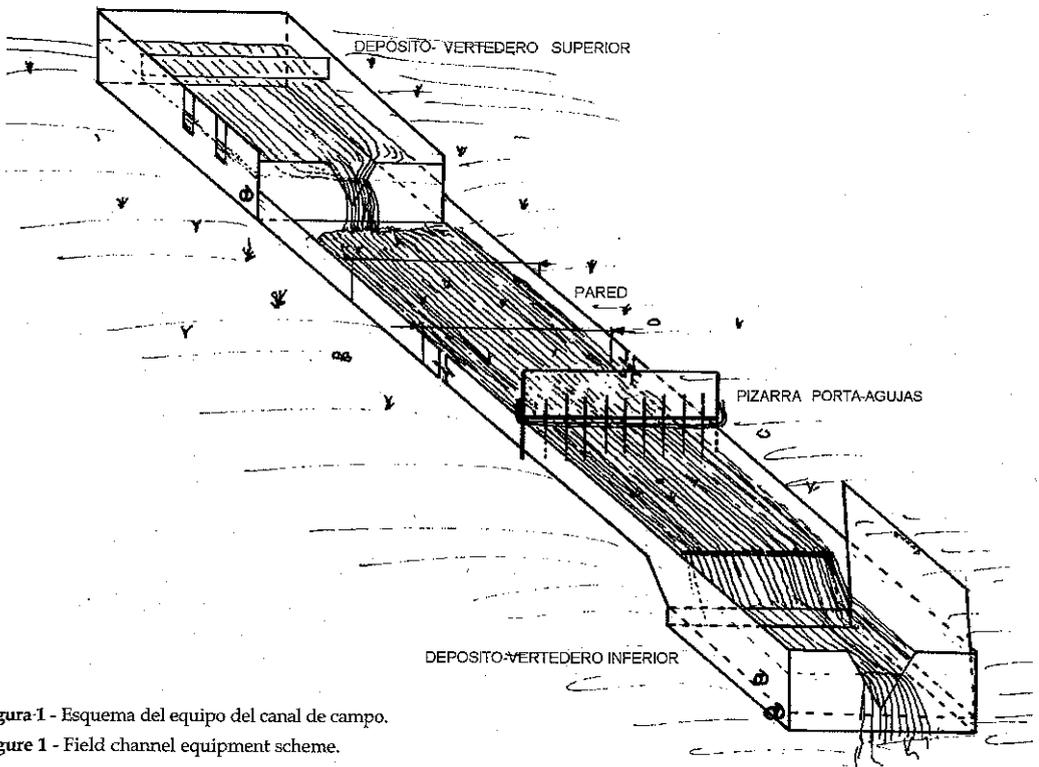


Figura 1 - Esquema del equipo del canal de campo.

Figure 1 - Field channel equipment scheme.

miento, constituido esencialmente por los siguientes elementos:

- Sistema de depósitos vertederos superior e inferior.
- Paredes del canal.
- Pizarra porta-agujas
- Otros accesorios complementarios, pero imprescindibles.

Sistema de depósitos vertederos superior e inferior.

El depósito vertedero superior de forma poliédrica, construido con material de poliéster reforzado con fibra de vidrio, de dimensiones 1.500 mm de largo por 1.000 mm de ancho y 650 mm de profundidad, tenía los siguientes cometidos:

1. - Almacenar y estabilizar el flujo de agua procedente de una motobomba.
2. - Medir el caudal de agua Q_s evacuado a través del vertedero triangular situado en el extremo final del depósito.

En su interior disponía de unos elementos metálicos para conseguir un refuerzo perimetral y también contaba con una pantalla tranquilizadora, para tratar de estabilizar el flujo y que éste atravesara el vertedero con una velocidad moderada, que permitiera tomar la medida en la lámina vertiente. Asimismo, para facilitar el desagüe del depósito, una vez finalizados los ensayos, se le dotó de un orificio de fondo con una válvula incorporada al mismo.

El vertedero, situado en el extremo opuesto al de llenado del depósito, tenía forma de uve, en lámina delgada de arista viva, formando un ángulo de 30° . Su material era de latón de aleación. Se eligió el ángulo de 30° porque el rango de caudales ensayados oscilaba en torno a los 25 l/s; a fin de que una pequeña modificación del caudal en el entorno de dicha magnitud, le correspondiera una variación sensible en la altura del vertido h , facilitando de este modo su lectura.

El caudal de vertido Q_s se determinó a través de la ecuación:

$$Q = m \cdot \omega \cdot \sqrt{2g \cdot h^3}$$

donde:

- h , es la altura de la lámina de vertido, en m.
- ω , el ángulo del vertedero, en este caso de 30° .
- m , el coeficiente de gasto, que depende de la altura de la lámina de vertido h y cuyo valor oscila entre: 0,384 (para $h = 0,035$ m) $> m > 0,330$ (para $h = 0,330$), según los valores aportados por D. ESCRIBÁ BONAFÉ en su texto Hidráulica para Ingenieros (1988), páginas 16.14 y 16.15. Dicho rango se consideró adecuado para los ensayos, tras una comprobación a modo de primera aproximación en las tres pruebas iniciales.

Como medida de protección aguas abajo del vertedero se dispuso una lona de plástico, para evitar socavaciones al comienzo del lecho

El depósito vertedero inferior, fabricado con el mismo material que el depósito superior, presentaba una planta rectangular con las siguientes dimensiones: 1.038 mm de largo, 1.000 mm de ancho y 500 mm de altura. Su misión era cumplir con las dos funciones siguientes:

1. - La de medir el caudal que pasaba por su vertedero.
2. - Recibir en su depósito los sedimentos producidos por la erosión provocada por la lámina de escorrentía a lo largo del lecho, en aquellos ensayos en los que realmente se produjo una erosión importante y se tomaron muestras de los materiales transportados, básicamente de acarreos. También se tomaron muestras de agua en su vertedero, que permitieran medir la concentración de los sedimentos en suspensión en las láminas de escurrido.

Este depósito, por tanto, disponía de un doble fondo y de un dispositivo de entrada adecuado para separar los acarreos más gruesos. El vertedero situado al final del mismo presentaba la misma forma, el mismo ángulo y estaba construido con los mismos materiales que el vertedero del depósito de cabecera. Finalmente, para vaciarlo disponía de dos válvulas, una

situada a nivel del fondo y otra por encima del doble fondo.

Paredes del canal

Las paredes del canal se formaron con planchas de chapa galvanizada de 1,5 mm de espesor, 2.000 mm longitud y 25 mm de anchura. La instalación de las chapas consistió sencilla y únicamente en solapar la chapa anterior sobre la posterior en dos filas; formando el canal propiamente dicho con una anchura aproximada de un metro.

Pizarra porta-agujas

La misión de este accesorio era la de medir el calado de la lámina de agua en diferentes puntos de una sección transversal del canal de ensayo. Consistía en una U de hierro invertida de dimensiones 1.300 mm de longitud en el travesaño y con 510 mm en cada pie. En el travesaño tenía practicados unos orificios de 50 mm, en los cuales se insertaban las agujas de calibración con las que se medía la profundidad del flujo.

En la cara superior del travesaño se dispuso una cubierta de goma de 5 mm de espesor, para aumentar el rozamiento de las varillas metálicas y controlar su posible deslizamiento sobre los orificios

Cada aguja de calibración presentaba dos elementos: el primero consistente en una varilla de hierro lisa, de 4 mm de diámetro, en cuyo extremo se incorporaba el segundo elemento; un alambre de tipo cordón de piano de 1,5 mm de espesor, formando un ángulo de 90° en su extremo inferior. Para la calibración milimétrica del flujo se dispuso de una camisa de plástico.

El diseño de este accesorio se inspiró en un dispositivo conocido como perfilador bidimensional de agujas, desarrollado por C. SANCHO, G. BENITO y M. GUTIÉRREZ (1991) del Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Zaragoza; que a su vez es una modificación de un ingenio anterior de J. DE PLOEY y D. GABRIELS (1980) destinado a medir procesos erosivos.

Otros accesorios requeridos para los ensayos

Además del material citado, los ensayos precisaron de los siguientes accesorios:

- Una moto-bomba.
- Un depósito de almacenamiento de agua para acumular el agua necesaria para los ensayos; o en su defecto el propio depósito del camión cisterna cuya motobomba se utilizó en las pruebas.
- Una manguera para la traída del agua desde el depósito de almacenamiento, o desde el camión cisterna, hasta el depósito-vertedero superior.
- Un nivel para la medición de la pendiente.
- Dos reglas milimétricas para medir la altura de vertido en los depósitos superior e inferior.
- Cinta métrica para medir las dimensiones del canal.
- Picos, palas, azadas, etc. para instalar el canal en el campo
- Cronómetros.
- Cuaderno y estadillos de campo.

Método

Preparación de los ensayos

La preparación de cada ensayo incluía las siguientes operaciones:

- a.- Elección del lecho. Los criterios de selección se basaron en los factores pendiente y tipo de vegetación; pues todos los ensayos se asentaron sobre el mismo tipo de suelo, una formación conocida como raiñas, que presentaba suelos de textura franca y que geológicamente pertenece al Mioceno.
- b.- Señalamiento del lugar de ubicación de los depósitos-vertederos (superior e inferior) y de la sección del canal (de anchura aproximada de un metro y en ningún caso inferior a 900 mm).
- c.- Medida de la longitud del canal (nunca inferior a 12 m).
- d.- Excavación de las zanjas y de las plataformas, en los lugares previamente marcados para la ubicación de los depósitos y las paredes del canal de ensayo.
- e.- Instalación de los depósitos y de las planchas que conformaban el canal.
- f.- Ajuste, relleno y compactación de las zanjas; intentando la mayor estanqueidad

- posible. Cuando fue necesario se remató la cara interior del canal.
- g.- Llenado de agua del depósito-vertedero superior hasta el nivel indicado por el vértice inferior del triángulo.
 - h.- Instalación de la regla milimetrada, calibrando el cero de la misma al nivel de la superficie del agua enrasada con el vértice del vertedero (en ambos depósitos, superior e inferior).
 - i.- Instalación y nivelación de las pizarras porta-agujas en las secciones de medida.
 - j.- Medición de la pendiente del lecho con un nivel de agua.

Fases de los ensayos

Cada ensayo se dividió en dos fases: en la primera, definida como de *régimen no estabilizado*, el agua comenzaba a mojar el suelo y a recorrer la ladera hasta llegar al depósito inferior; en la segunda, se producía un *régimen estabilizado* que prácticamente se consideró permanente y uniforme.

A)- Se definió como fase en *régimen no estabilizado*, al tiempo transcurrido desde que empezaba a verter el agua por el depósito superior con un caudal Q_s (caudal superior), hasta el momento en que el depósito inferior comenzaba a verter un caudal Q_i (caudal inferior) suficientemente cercano al caudal superior; es decir, hasta que el caudal alcanzado en la sección final del canal, resultaba prácticamente igual al que pasaba por el vertedero del depósito superior

Para facilitar las operaciones, que por su dinámica resultaban difíciles de estabilizar, se concretó que la fase se daba por concluida cuando la diferencia $(Q_s - Q_i) < 0,2 Q_s$; momento en el que se admitía que el régimen pasaba prácticamente a permanente y uniforme y comenzaba la segunda fase.

B)- La segunda fase, en *régimen permanente y uniforme*, fue en la que realmente se efectuaron las mediciones del ensayo. Para ello se precisó de la colaboración de al menos seis personas y normalmente se dispuso de siete, para:

- Medir los calados (h_s , h_i) en los vertederos de los depósitos superior e inferior. El

encargado de medir h_i anotaba también la turbidez que iba adquiriendo el flujo y tomaba muestras de agua a su paso por el vertedero.

- Medir los calados d_{is} del flujo con las agujas calibradoras en las correspondientes secciones del canal.
- Anotar la información facilitada por los dos operarios encargados de medir (h_s , h_i) y del operario que tomaba los calados d_{is} ; así como inspeccionar el comportamiento del flujo en el canal, en especial lo relativo a los procesos erosivos del lecho.
- Trasvasar el agua desde el depósito de almacenamiento al depósito superior del canal mediante la motobomba de un camión cisterna; o bien cargar directamente el depósito superior del canal desde el camión cisterna. Normalmente para esta operación se requerían dos personas, pues el agua se transmitía a una presión elevada.

Terminados los ensayos, se recogían las muestras de agua tomadas en el vertedero inferior y se evacuaban los acarreo acumulados en el depósito inferior. Las primeras se remitían al laboratorio para obtener la información correspondiente a los sedimentos en suspensión que presentaba el flujo del canal; los acarreo se analizaban *in situ* (dimensiones características y densidad).

Localización de los canales de ensayo y características de los mismos

El paraje elegido para instalar los canales de ensayo y las características más significativas del mismo se sintetizan en la Tabla 1. En cuanto a los aspectos específicos de los lechos en los que se realizaron los ensayos, el número de éstos efectuados en cada lecho y el número de secciones en los que se tomaron calados del flujo en cada ensayo se detallan en la Tabla 2.

RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS DE LOS MISMOS

Resultados obtenidos

Durante los ensayos realizados en los respecti-

vos canales de campo, se midieron los calados del flujo en un número determinado de puntos de varias secciones transversales de cada canal, como se especifica en las tres últimas columnas de la Tabla 2.

Con dicha información se determinaba el calado medio de cada sección, estableciendo su media aritmética; conocida asimismo la anchura de la sección, por medición directa de la misma; dado que el caudal de cálculo resultaba

Área de los ensayos		Término municipal de Puebla de Valles, provincia de Guadalajara en la Comunidad Autónoma de Castilla la Mancha	
Situación:	Latitud 40º 56'		
Longitud	3º 16'		
Altitud:	950 m		
Exposición:	Lechos 1,2 y3: umbría Lechos 4,5,y 6 solana		
Pendiente:	Desde 11,7 % hasta 39,5 %		
Suelo:	Suelos Francos sobre rañas del Mioceno		
Vegetación:	Formación herbácea con especies de los genero <i>Dactylis</i> , <i>Lolium</i> , <i>Festuca</i> etc. Formación de matorral sub-arbustivo bastante homogéneo con especies dominantes <i>Cistus ladanifer</i> L., <i>Rosmarinus officinalis</i> L., <i>Thymus</i> sp y <i>Daphne gnidium</i> L. Formación arbórea formada principalmente por <i>Pinus pinaster</i> Ait., <i>Pinus nigra</i> Arnold y <i>Quercus ilex</i> L.		

Tabla 1. - Situación geográfica-administrativa y características físicas del área donde se realizaron los ensayos.

Table 1. - Geographic-administrative location and physical characteristics of studied area.

Lecho Número	Características del lecho		Especificaciones sobre los ensayos		
	Pendiente (%)	Cubierta vegetal	Número ensayos	Secciones por ensayo	Calados en cada sección
1	11,7	Pastizal de hierba	3	4	De 4 a 5
2	29,5	Matorral incipiente sobre un suelo afectado por una roza manual para preparar una repoblación forestal.	2	4	5
3	37,0	Matorral de jara y romero en suelo no alterado	2	4	6
4	15,3	Matorral y pinar claro	2	3	7
5	13,7	Pinar en estado de latizal con matorral de jara como sotobosque	1	2	7
6	15,5	Pinar en estado de fustal con matorral de jara como sotobosque	1	2	7
0	39,5	Ninguna; existía un decapado total del suelo	No fueron posibles los ensayos, pues la lámina de agua en el canal ocasionó un arrastre total del suelo		

Tabla 2. - Características específicas de los lechos donde se realizaron los ensayos; número de éstos efectuados en cada lecho; número de secciones en los que se definieron los calados del flujo y número de calados considerados en cada sección.

Table 2. - Specific characteristics of channel beds where the tests were performed; number of tests per bed; number of sections where the flow depth were defined and number of flow depth considered in each section.

LECHO	ENSAYO	CAUDAL (m ³ /s)	CALADO (m)	VELOCIDAD (m/s)	MANNING	FROUDE	REYNOLDS
1 (pastizal)	1	0,0042	0,029	0,129	0,244	0,242	3.741
1 (pastizal)	2	0,0151	0,046	0,293	0,143	0,436	13.478
1 (pastizal)	3	0,0270	0,061	0,395	0,125	0,510	24.095
2 (roza-mat)	1	0,0083	0,031	0,243	0,211	0,441	7.533
2 (roza-mat)	2	0,0045	0,030	0,136	0,368	0,251	4.080
3 (jara)	1	0,0028	0,025	0,100	0,505	0,202	2.500
3 (jara)	2	0,0133	0,032	0,371	0,158	0,663	11.872
4 (mat-pinar)	1	0,0031	0,019	0,141	0,190	0,326	2.679
4 (mat-pinar)	2	0,0061	0,020	0,263	0,106	0,594	5.260
5 (pinar 1)	1	0,0086	0,023	0,389	0,075	0,819	8.947
6 (pinar 2)	1	0,0035	0,018	0,177	0,147	0,421	3.186
Valores medios por ensayos			0,030	0,240	0,207	0,446	7.943
Valores medios por secciones			0,028	0,169	0,241	0,351	4.259

Tabla 3. - Resultados medios de los ensayos sobre los lechos naturales.

Table 3. - Average results from tests performed on natural beds.

conocido, por haber sido determinado en los vertederos de los depósitos superior e inferior del canal; la velocidad media del flujo en cada sección se establecía aplicando la ecuación de continuidad:

$$Q = (h \cdot b) \cdot v$$

Conocida la velocidad media en cada sección, a continuación se determinaban para la misma los restantes parámetros hidráulicos que definían el movimiento del agua por la ladera en cuestión, tales como: el coeficiente de rugosidad de MANNING n y los números hidráulicos de FROUDE F y de REYNOLDS R para el flujo.

Estos valores se obtuvieron para 38 secciones en el transcurso de 11 ensayos, repartidos del modo siguiente: 12 secciones en 3 ensayos para el canal 1; 8 secciones en 2 ensayos para cada uno de los canales 2 y 3; 6 secciones en 2 ensayos para el canal 4 y finalmente 2 secciones en 1 ensayo para cada uno de los canales 5 y 6

Posteriormente se determinaron los valores medios de los distintos parámetros hidráulicos determinantes del flujo, para cada uno de los

ensayos realizados en los respectivos canales de campo

En la Tabla 3 se exponen los datos referentes a los calados medios para cada uno de los ensayos, a partir de los cuales se han calculado las velocidades, los coeficientes de rugosidad de MANNING n y los números de FROUDE F y REYNOLDS R correspondientes a los mismos. Asimismo, en la fila 13 de dicha Tabla se aportan los valores medios de los diferentes términos representados en la misma, atendiendo exclusivamente al número de ensayos y bajo el título de valores medios por ensayo

Sin embargo, si se consideran conjuntamente los valores de los mencionados parámetros hidráulicos definidos en las 38 secciones, analizadas en el transcurso de los 11 ensayos, calculándose a continuación los valores medios de los mismos; los resultados obtenidos son los que aparecen en la fila 14 de la misma Tabla 3, con el epígrafe de valores medios por secciones. Estos últimos valores difieren de los de la fila anterior, pero suponen una aproximación más ajustada del fenómeno analizado, al dar un peso igual a todas las secciones, en lugar de

Lecho	Ensayo	Pendiente	Tipo de vegetación	Calado (m)	Tensión de arrastre (kg/m ²)	Formación de recursos	Concentración (g/m ³)
1	1	0,117	Pastizal	0,029	3,393	No	0,097
1	2	0,117	Pastizal	0,046	5,382	No	
1	3	0,117	Pastizal	0,061	7,137	No	
2	1	0,295	Roza-mat	0,031	9,145	No	1,920
2	2	0,295	Roza-mat	0,030	8,850	Si	0,356
3	1	0,370	Jara	0,025	9,250	Si	
3	2	0,370	Jara	0,032	11,840	Si	24,370
4	1	0,153	Mat-pinar	0,019	2,754	No	
4	2	0,153	Mat-pinar	0,020	3,060	No	
5	1	0,138	Pinar	0,023	3,036	No	
6	1	0,155	Pinar	0,018	2,365	No	7,370

Tabla 4. - Valores de la tensión de arrastre para los flujos de los ensayos efectuados sobre los lechos naturales, en los que se detectaron regueros incipientes.

Table 4. - Shear stress values for discharges corresponding to tests performed on natural beds which incipient water fissures were detected.

ponderar por el número de ensayos como en el caso de la fila precedente.

Otro aspecto que se consideró fue el relativo a la tensión de arrastre τ , correspondiente a las láminas de escurrido de los diferentes ensayos realizados en los canales de experimentación; dependiendo del calado de dichas láminas h y de la pendiente del lecho j según se establece en la ecuación: $\tau = h \cdot j \cdot \gamma$ (donde γ es el peso específico del agua 10^3 kg/m^3); así como su relación con la presencia o no de procesos erosivos (regueros incipientes) en la solera de los canales. En la Tabla 4 se resumen los resultados obtenidos al respecto en las experiencias realizadas en los canales.

Asimismo, durante la ejecución de algunos ensayos, se tomaron muestras de agua en el vertedero del depósito inferior. Dichas muestras se llevaron al laboratorio para determinar la concentración de los sedimentos en suspensión en las mismas. Los resultados se detallan en la columna octava de la Tabla 4.

También se recogieron en el depósito inferior, durante algunos de los ensayos efectuados, los materiales que fueron arrastrados hasta el mismo; de manera que una vez concluidos los

ensayos se procedió a su evacuación y medición de sus principales características (peso, volumen, densidad, diámetros característicos superior e inferior). Sin embargo dicha información no fue utilizada posteriormente por ser insuficiente para llegar a alguna conclusión.

En realidad no se pudo llevar a cabo una medición sistemática de la erosión en el lecho, ni del transporte de los materiales en el canal, porque el control de la lámina de escurrido absorbía toda la atención del equipo. El proceso, que requería un trabajo prolongado y costoso de preparación, se desarrollaba a gran velocidad y en un intervalo muy corto de tiempo una vez iniciado el escurrimiento; de manera que todos los esfuerzos se dirigían en controlarlo, tomar las medidas de los caudales en los vertederos de entrada y de salida del canal y en medir los calados en sus diferentes secciones durante el ensayo.

Análisis de los resultados obtenidos de los ensayos realizados en los canales de campo

Se analizan a continuación los resultados, diferenciando los que tratan del coeficiente de rugosidad de los lechos por los que discurren las láminas de agua (Tabla 3); de los que se refieran a la implicación de la tensión de arrastre de dichas láminas, con el inicio de los pro-

cesos erosivos (regueros incipientes) en los lechos por los que circulan (Tabla 4).

Para dicho análisis se considera oportuno comentar, paralelamente y en forma resumida, algunas de las investigaciones realizadas sobre las mismas cuestiones por autores precedentes, cuyos trabajos ya publicados se utilizan de referencia.

Análisis de los resultados obtenidos del coeficiente de rugosidad de MANNING en los lechos objeto de los ensayos

Los resultados de los ensayos efectuados confirman que:

- a.- Los valores obtenidos del coeficiente de rugosidad de MANNING son altos; lo que parece lógico, pues al ser los calados muy pequeños, las rugosidades relativas resultan muy elevadas.
- b.- Como se aprecia en la Tabla 3, los valores obtenidos del número de MANNING presentan una gran dispersión, oscilando entre $0,505 > n > 0,075$; tomando un valor medio en torno al 0,241 (valor medio para todas las secciones analizadas).

El origen de esta dispersión se debe básicamente a las irregularidades que se presentan en los lechos naturales para cualquier valor de la pendiente; a lo que se añade, según V.T. CHOW (1959), que un flujo tiende a ser inestable cuando aumenta la pendiente. Además, cuando los lechos están cubiertos de vegetación, ésta constituye una nueva forma de rugosidad, puesto que sus efectos son justamente los de frenado de la lámina de escurrido (V.T. CHOW, 1959). R.H. TAYLOR Jr. y N.H. BROOKS (1962) relacionaron la tensión de arrastre τ del flujo con el coeficiente de MANNING n , diferenciando para éste dos componentes. La ecuación que adoptaron fue:

$$\tau = \gamma \cdot h \cdot (j' + j'')$$

donde:

- γ es el peso específico del agua, en kg/m³
- h , el calado del flujo, en m.
- j' , la pendiente asociada con la tensión media del suelo.
- j'' , la pendiente asociada con la resistencia de los elementos de la vegetación.

Para los citados autores:

$$j' = \left(\frac{n_s}{n}\right)^2 j$$

$$j'' = \left(\frac{n_v}{n}\right)^2 j$$

$$n = \sqrt{n_s^2 + n_v^2}$$

donde

- n_s , es el coeficiente de resistencia debido únicamente al suelo.
- n_v , el coeficiente de resistencia debido al rozamiento que ofrece la vegetación.
- n , el coeficiente de resistencia de MANNING definitivo para el canal.
- j , la pendiente del canal, en m/m.

D. M. TEMPLE, se apoyó en los trabajos de R.H. TAYLOR Jr. y N.H. BROOKS, para desarrollar entre 1980-83 un modelo de resistencia del flujo en canales con vegetación herbácea. Analizando el problema desde el punto de vista de la tensión de arrastre, señaló acertadamente que una parte de la tensión tractiva τ se transmite al suelo a través del sistema radical de las plantas; no debiéndose considerar la misma en el momento de analizar y cuantificar las fuerzas que intervienen en la estabilidad del cauce.

También llegó a la conclusión, trabajando en el mismo ámbito que otros investigadores anteriores como A.R. ROBINSON y A.R. ALBERTSON (1952) y D.T. KAO y B.J. BARFIELD (1978), que la vegetación disipa las turbulencias dependiendo en mayor o menor medida de la densidad de las plantas y de su contacto con el perfil superior del suelo (en la capa límite).

El autor desarrolló una exhaustiva investigación, tanto teórica como de experimentación, fruto de la cual definió la ecuación:

$$n_v = \sqrt{n_R^2 + (0,0156)^2}$$

donde: n_R , es la retardancia debida a la vegetación (que se puede definir a través de las curvas elaboradas al efecto por el USDA-S.C.S.,

1954); mientras que 0,0156 es la retardancia para un suelo desnudo formado de partículas sueltas. En consecuencia:

$$n = \sqrt{n_R^2 + (0,0156)^2 + n_s^2}$$

En la década de los años 70, varios investigadores trataron de establecer el coeficiente de rugosidad de MANNING por el método del hidrograma, para escorrentías en parcelas en las que se simulaba la lluvia artificialmente.

De este modo, W.W. EMMET (1970) estableció, tras sus ensayos en parcelas experimentales de (13,2x2,4) m² y (14,4x 2,4) m², que el coeficiente de rugosidad de MANNING variaba ampliamente en torno a un valor medio de $n = 0,5$.

W.O. REE, F.L. WINBERLEY y F.R. CROW (1977) definieron para el coeficiente de rugosidad de MANNING valores comprendidos entre $0,21 < n < 0,60$ en los ensayos realizados en parcelas de campo.

En la década siguiente, G.R. FOSTER, C.B. JOHNSON y W.C. MOLDENHAUER (1982) experimentaron con tintes dentro del flujo para obtener el número de MANNING, en el transcurso de sus estudios encaminados al control de la erosión. De manera análoga a D.M. TEMPLE, asignaron para el suelo desnudo y suelto un valor de $n = 0,01$; obteniéndose una gran variabilidad para las restantes situaciones.

Finalmente E.T. ENGMAN (1986), investigando en parcelas de campo con las dimensiones normalizadas del USDA -A.R.S. y para intensidades de lluvia entre 50-100 mm/h, estableció para el número de MANNING valores superiores a los definidos por G.R. FOSTER *et al.* (1982) y más bajos que los aportados por W.W. EMMET (1970).

El rango de variación que de acuerdo con los citados autores quedaba establecido para el coeficiente de rugosidad de MANNING, resultaba entre similar y algo superior a los obtenidos en los ensayos efectuados en los canales de campo, descritos en este artículo y aportados

en la Tabla 3; donde se aprecia que: $0,075 < n < 0,505$. Es posible justificar que estos últimos valores sean algo más bajos; porque al ser obtenidos en canales, aparece una lámina de escurrido con un calado definido, que en el caso que nos ocupa presenta un valor medio de 30 mm. Pero lo más destacado es constatar que en todas las situaciones queda de manifiesto la gran variabilidad del coeficiente n de rugosidad de MANNING.

Profundizando en el tema, se recuerda que en la deducción de la fórmula de MANNING se asume la condición que la pérdida de carga es continua y regular sobre el perímetro mojado; lo que implica la aplicación de la ecuación de igualdad entre la fuerza de resistencia que ofrece el contorno del lecho y la componente de la fuerza de peso en la dirección del movimiento; llegando a la expresión de MANNING descrita en la introducción de este artículo. De acuerdo con lo expuesto, lo que condiciona fundamentalmente a la velocidad, a igualdad del radio hidráulico (que en este caso se asimila con el calado), es la pendiente; porque el agua escurre debido a la gravedad.

Sin embargo, para flujos de calados muy pequeños, como los que se comentan en este documento, que escurren sobre lechos naturales provistos de vegetación y con pendientes muy variables, la rugosidad relativa que presenta el lecho al movimiento del agua llega a ser muy importante; lo que ha motivado a que algunos autores cuestionen que la velocidad que alcanza la lámina de vertido por la ladera sea proporcional a la raíz cuadrada de la pendiente; para plantear que debe ser en una proporción menor.

A idéntica conclusión se ha llegado también en las investigaciones más recientes sobre la circulación del agua por cauces macro-rugosos con pendientes elevadas, independientemente de la presencia de la vegetación en la solera y considerando calados de cierta entidad, como es el caso de los torrentes y cursos de agua de montaña. Así R. D. JARRET (1990), en una investigación realizada en el U.S. Geological Survey y el Rocky Mountain Hydraulic Laboratory para

torrentes de montaña del estado de Colorado, estableció la siguiente ecuación para definir la velocidad de la corriente:

$$v = 3,17 \cdot f^{0,12} \cdot R^{0,83}$$

por lo que para determinar el coeficiente de rugosidad de MANNING propuso la ecuación:

$$n = 0,32f^{0,38} \cdot R^{-0,16}$$

Sustituyendo en esta última ecuación de R.D. JARRET los calados y las pendientes correspondientes a los ensayos que aparecen en la Tabla 3, los resultados obtenidos ofrecieron el mismo rango de magnitud que los valores del coeficiente de rugosidad de MANNING determinados directamente en los ensayos, siguiendo el procedimiento descrito al presentar la experimentación objeto de este documento.

En la Figura 2. se comparan los valores del coeficiente de MANNING, resultantes de los ensayos realizados en los lechos que se definen en la Tabla 3, con los determinados a través de la ecuación de R.D. JARRET.

Análisis de los resultados que tratan de relacionar la tensión de arrastre de las láminas de agua que escurren por los canales de ensayo, con la formación de procesos erosivos (regueros incipientes) en sus soleras.

Es evidente que la tensión tractiva de la lámina de agua: $t = g \cdot h \cdot j$, ejerce una capacidad erosiva sobre la solera del canal de ensayo. Dicho efecto se manifiesta expresamente cuando aparecen en éste los primeros regueros. La Tabla 4 sintetiza esta situación para los ensayos concretos que en ella aparecen. Este aspecto entra de lleno en el ámbito de la conservación de suelos y su análisis se abordará desde esta perspectiva.

J.M. GARCÍA NÁJERA (1954-55) desarrolló un modelo teórico sobre pendientes máximas admisibles para cultivos y pastizales, que posteriormente verificó experimentalmente en un canal de laboratorio. En su teoría planteó dos umbrales: al primero de ellos le denominó *pendiente de iniciación de la erosión generalizada y al segundo pendiente de arrastre total*.

El autor establecía que por debajo del primer umbral se trataba de áreas cultivables; por encima de él, hasta alcanzar el segundo umbral, el cultivo debía estar acompañado por prácticas de conservación de suelos pertinentes; finalmente, superado el segundo umbral, se debía reservar el suelo para cubiertas vegetales permanentes. Las experiencias en el canal del laboratorio establecieron para la pendiente de iniciación de la erosión generalizada un valor en torno al 12% y para la pendiente de arrastre total del suelo un 18 %.

Asimismo, J.M. GARCÍA NÁJERA demostró teóricamente que los pastizales bien conservados protegían al suelo frente a la erosión hasta pendientes del orden del 30 %; por encima de dicho valor se recomendaba el empleo de cubiertas arbustivas no degradadas y preferiblemente del arbolado; sugiriendo en su defecto la repoblación forestal.

Determinadas las hipotéticas tensiones de arrastre que resultan para los umbrales establecidos por J.M. GARCÍA NÁJERA en su teoría de conservación de suelos, éstos se indican en la Tabla 5. Comparando a continuación los resultados de las Tablas 4 y 5, se observa que la tensión de arrastre crítica, que causa la aparición de regueros en los lechos 2 y 3 de ensayo,

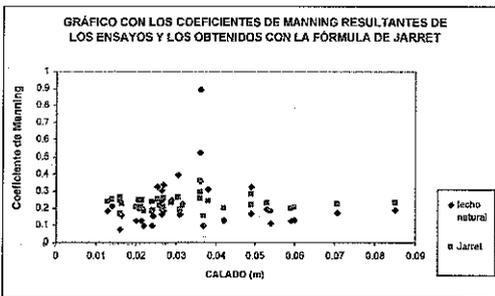


Figura 2 - Comparación de los valores del coeficiente de MANNING resultantes de los ensayos en los lechos naturales, con los valores del mismo coeficiente obtenidos con la fórmula de R. D. JARRET.

Figure 2 - Comparison between Manning coefficients derived from tests performed on natural beds and those obtained using the R.D. JARRET equation.

está en el rango de 9 kg/m^2 ; que prácticamente se corresponde con el segundo umbral establecido por J.M. GARCÍA NÁJERA.

El lecho 2 lo formaba un suelo franco cubierto de matorral de jara (*Cistus ladanifer*) poco lignificado, con aspecto similar a un pastizal no muy bien conservado (pues escasamente un año antes había sido sometido a una roza manual) y una pendiente prácticamente del 30 %. Los dos ensayos realizados en este lecho señalaron que: cuando aún conservaba el efecto parcial de las labores de la roza según curvas de nivel (durante el ensayo 1), no tuvo lugar la formación de regueros; mientras que en el ensayo 2, al desaparecer dicho efecto, se pusieron de manifiesto.

En el lecho 3, con una pendiente superior al 30 %, se apreciaron regueros para un suelo cubierto de matorral prácticamente sin alterar de jara (*Cistus ladanifer*) como especie dominante, junto con romero (*Rosmarinus officinalis*) y otras especies con bastante menor frecuencia. En este caso se superó la tensión de 9 kg/m^2 en ambos ensayos.

En los restantes ensayos no se apreciaron regueros; ni en el lecho 1, cubierto de pastizal y con una pendiente <12%; ni en el lecho 4 ubicado en una zona de pinar claro, con el canal propiamente dicho cubierto de matorral y una pendiente de 15,3 %; ni en los lechos 5 y 6, situados en zonas de pinar con pendientes del 13,8 % y 15,5 % respectivamente. La tensión de arrastre del flujo en todos ellos no alcanzó el valor de 9 kg/m^2 , situándose por debajo de 8 kg/m^2 .

En la última columna de la Tabla 4, se observa como para el lecho 3, cubierto de matorral de jara (especie dominante) y romero, la concentración de sedimentos en suspensión para un flujo de 32 mm de calado se eleva hasta 24,4 g/l; mientras que para un calado similar, circulando la lámina de agua sobre un pastizal (lecho 1) resulta prácticamente inapreciable 0,10 g/l. (El caso del lecho 6 resulta aparentemente un tanto anómalo por tratarse de un pinar; pero cabe señalar que los pinares climá-

camente mediterráneos suelen tener mucho material sólido, a modo de polvo o sedimentos finos, retenido en la pinocha y otros restos vegetales, que posiblemente tienen su origen en el polvo que levanta el viento (por sí mismo o por el paso de vehículos y animales) en los días secos y soleados. Este material es arrastrado por la lámina de escurrido cuando le pasa por encima o simplemente cuando lo bordea, lo que contribuye a incrementar el contenido de materia sólida en suspensión de dicha lámina).

Se señala finalmente que otra de las aportaciones teóricas de J.M. GARCÍA NÁJERA (1955), justificando analíticamente la hipótesis que *la velocidad de una lámina de agua, que escurre por una ladera cubierta por vegetación, se reduce aproximadamente a la cuarta parte de la que tendría la misma lámina en ausencia de vegetación en la ladera*, ha sido evidenciada experimentalmente, gracias a una investigación llevada a cabo por I. NEZU y K ONITSUKA (1999). Estos autores empleando un canal de laboratorio de dimensiones 10 m de largo por (400x300) mm² de sección, simulando la vegetación con varillas rígidas de metal y utilizando un método conocido como *Laser Doppler Anemometer (LDA)* para medir las condiciones de la velocidad, llegaron a la conclusión que la velocidad en la zona del canal ocupada por las varillas metálicas llegaba a reducirse hasta el 20 o el 25 %, respecto a la velocidad en la zona donde el canal se mantenía en su situación original.

CONCLUSIONES

En relación con la determinación del coeficiente de rozamiento en la solera del canal, generalizando en la ladera de una cuenca hidrográfica, por el que circula la lámina de escurrientía, se recomienda tener en cuenta las siguientes pautas:

En el movimiento de una lámina de agua por una ladera, ésta podría llegar a presentar una rugosidad tal, que suponga un efecto determinante en la circulación del flujo que aconseje el establecimiento de una ecuación específica para definirla; conclusión a la que han llegado diversos investigadores.

Pero en el supuesto que se opte por la utilización de las ecuaciones tradicionalmente concebidas en la Hidráulica de los cauces abiertos, como es el caso del empleo de la fórmula de MANNING; se advierte que el coeficiente de rozamiento n toma valores elevados en este tipo de movimientos.

La experimentación presentada en este documento, establece un valor medio de $n = 0,241$ para el conjunto de las 38 situaciones estudiadas (Tabla 3, última fila). Pero si se consideran los resultados medios de los ensayos efectuados sobre cada uno de los lechos naturales, tal como se indican en las filas anteriores de la columna 4 de la citada tabla, se observa que el rango de variación absoluto se encuentra comprendido entre $0,075 < n < 0,505$.

Estos valores no aportan una conclusión determinante, pero están en el mismo rango que los obtenidos por otros autores en sus investigaciones. No obstante, lo más significativo es que ponen de manifiesto que el movimiento del agua en una ladera, difiere de la idea que normalmente se tiene formada para flujos más o menos encauzados. Asimismo se ha tratado de cuantificar el rango del coeficiente de rozamiento para las laderas que actúan como solera de los movimientos citados, cuando se opta por seguir utilizando las ecuaciones tradicionalmente concebidas en la Hidráulica de los cauces abiertos.

Respecto a la utilización de los valores de las tensiones de arrastre generadas por la lámina de agua que escurre por una ladera, se plantean las siguientes reflexiones:

La determinación de la tensión de arrastre para las láminas de escurrido en los ensayos comen-

taos en este documento (Tabla 4), evidencia que la aparición de los regueros en la solera se produce para valores del orden de 9 kg/m^2 , algo superior que el que resulta para la pendiente de arrastre total que establece J.M. GARCÍA NÁJERA para cultivos en $8,1 \text{ kg/m}^2$ (Tabla 5). Este último valor se ha obtenido reconstruyendo el trabajo de laboratorio realizado por el autor, apoyándose en el contenido que en su bibliografía aparece al respecto. Aunque también es cierto que el valor de 9 kg/m^2 es una cifra notablemente inferior a los $18,0 \text{ kg/m}^2$ que define J.M. GARCÍA NÁJERA para los pastizales bien conservados y con pendientes menores al 30 % (Tabla 5).

A la vista de estos resultados, la experimentación realizada no aporta un criterio determinante, e incluso valida solo parcialmente las hipótesis de J.M. GARCÍA NÁJERA; pero apunta una cuestión interesante, al señalar que una tensión del orden de 9 kg/m^2 supone un riesgo de erosión superficial importante y generalizado, sobre todo cuando las pendientes de la ladera resultan elevadas, $> 30 \%$, como ocurre en las situaciones contempladas en la Tabla 4.

Una consideración distinta merece el análisis de la última columna de la Tabla 4. En ella se observa que la concentración de sólidos en suspensión en las láminas de escurrido de los lechos 1 y 2 (cubiertos de pastizal el primero y de un tapiz similar al pastizal el segundo) es baja, e incluso en el lecho 1 resulta prácticamente despreciable; mientras que en el lecho 3, cubierto de matorral de jara con la especie *Cistus ladanifer* como especie dominante, la concentración de sedimentos en suspensión alcanza una cifra tan elevada como $24,4 \text{ g/l}$.

Tipo de lecho	Pendientes (%)	Calada (m)	Tensión τ (kg/m^2)
Agrícola	12	0,051	6,12
Agrícola	18	0,045	8,10
Pastizal	30	0,060	18,0

Tabla 5. - Valores de la tensión de arrastre del flujo para las pendientes de iniciación de la erosión generalizada y del arrastre total en las áreas de cultivo y de iniciación de la erosión en los pastizales bien conservados, según la aproximación realizada a J.M. GARCÍA NÁJERA.

Table 5. - Flow shear stress values for the widespread erosion initiation slopes and for the total swept away flow for cultivated areas, and incipient erosion in well-conserved pastures, according to an estimate made by J.M. GARCÍA NÁJERA.

Estos resultados parecen confirmar la hipótesis (aplicable sobre todo a los montes mediterráneos cuando en ellos tienen lugar fuertes aguaceiros), que los matorrales constituidos básicamente por especies del género *Cistus* ofrecen escasa protección al suelo frente a la erosión hídrica; lo que se detecta porque las escorrentías que se generan en los terrenos ocupados por dichas formaciones vegetales, presentan una alta concentración de sólidos en suspensión y en consecuencia sus suelos ofrecen una elevada proporción de piedras en su superficie.

El bosque como paradigma de la protección del perfil del suelo en la cuenca hidrográfica y por ende del relieve superficial del terreno

La conclusión final y más importante que se puede extraer de este documento, no se limita a los resultados comentados de las experiencias efectuadas en las laderas de los montes de Puebla de Valles (Guadalajara); sino a la conjunción de los mismos con las deducciones que se han ido simultaneando de las investigaciones de los diferentes autores, que se han comentado como apoyo para los mismos.

Nos referimos de un modo especial a D.M. TEMPLE, así como a I. NEZU y K. ONITSUKA; pero sin olvidar a los restantes investigadores, que sirvieron de apoyo a éstos; al tiempo que nos han permitido a los redactores de este documento dotar al mismo de la coherencia y precisión necesarias.

La aportación de D.M. TEMPLE, en el sentido que una fracción de la tensión tractiva de la corriente se transmite al terreno a través del sistema radical de las plantas y que ésta no debe ser tenida en cuenta al ponderar las fuerzas que intervienen en la estabilidad del cauce; condiciona a diferenciar la vegetación entre lignificada y no lignificada. La primera puede transmitir una parte más o menos importante de τ al suelo a través de las raíces; la segunda tiende a tumbarse cuando la corriente supera una tensión crítica, capaz de deformar la vegetación no lignificada.

Un pastizal bien conservado normalmente tiene un entramado de elementos vegetales

suficientemente denso, como para que cuando es atravesado por una corriente o lámina de agua, la velocidad de ésta se reduzca a una cuarta o una quinta parte de la velocidad que tendría si circulara por una solera sin vegetación, como se deduce de las experiencias de I. NEZU y K. ONITSUKA, o como lo justificó analíticamente con anterioridad J.M. GARCÍA NÁJERA; pero cuando el calado de la corriente supera la cota del propio pastizal, su resistencia a la tensión tractiva de la corriente decrece, en ocasiones de forma tan significativa, que puede generar incisiones importantes en el terreno o erosiones generalizadas en las áreas de mayor pendiente. Por el contrario, la vegetación lignificada, al no estar sujeta al efecto de tumbado, soporta mejor las tensiones del flujo, evitando de este modo los fenómenos de erosión puntuales sobre el terreno.

Sin embargo, si la vegetación lignificada no se complementa con una vegetación no lignificada en las zonas en contacto del mismo con el perfil del terreno; se puede estar contribuyendo a la generación de efectos turbulentos en el contacto del flujo con el tallo de las plantas; originando de este modo procesos erosivos en torno a los mismos. Esta situación se presenta en ciertas formaciones de matorrales de escaso porte y estructura constituida por pies aislados, que favorecen el movimiento del flujo a través de ellos, generando un lavado superficial del terreno, como es el caso de las formaciones vegetales donde predominan especies del género *Cistus*, como se ha analizado en el epígrafe anterior a estas Conclusiones.

Por consiguiente, sólo el bosque denso arbolado o el matorral alto no degradado, que cubre totalmente al suelo, tanto al ras del mismo como aportándole una cobertura aérea complementaria, constituye una estructura perfecta de defensa del suelo frente a la erosión hídrica; porque por un lado evita las turbulencias en contacto con la superficie del suelo, al existir en el mismo un entramado de vegetación denso o una cubierta de humus que lo sustituye, que dificulta en cualquier caso el movimiento localizado de la lámina de escurrido en esta zona

de contacto; también está a salvo del efecto de tumbado, dada la presencia de especies lignificadas en su composición y, por último, éstas transmiten una importante fracción de la tensión tractiva de la lámina de escurrido al terreno a través de sus raíces.

AGRADECIMIENTOS

La parte experimental de este documento se inició en 1993, simultaneando con los trabajos de campo del Proyecto de investigación, financiado por la CICYT (Ministerio de Educación y Ciencia), FOR 90-1005-C02-01: *Estudio de la eficacia protectora de las cubiertas forestales, de su implantación y tratamiento selvícola*, dirigido por el Profesor Rafael Serrada Hierro. En su ejecución se contó con el apoyo de la Delegación de Agricultura y Medio Ambiente de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha en la provincia de Guadalajara y muy especialmente de

su Servicio de Extinción de Incendios Forestales; que aprovechando el paréntesis estacional o temporada baja, conjugó sus ejercicios prácticos con una aportación inestimable para la ejecución de las experiencias de campo del Proyecto en cuestión; hasta el punto que su contribución fue decisiva para el mismo. Igual de decisiva fue la cesión de los terrenos que nos hizo el Ayuntamiento de Puebla de Valles (Guadalajara), para realizar en ellos los ensayos.

Se agradece asimismo al Profesor José Luis García Rodríguez y al Ingeniero de Montes Manuel Guijarro por su contribución en la ejecución de los trabajos de campo descritos en este documento.

Finalmente, se menciona que en su fase final la investigación, comentada en este artículo, contó con la ayuda del Proyecto LUCDEME dependiente de la Dirección General de la Conservación de la Naturaleza (Ministerio de Medio Ambiente).

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- CHOW, V.T. 1959. Hidráulica de los canales abiertos. MacGraw-Hill. 629 pag. Mexico D.F. (Mexico).
- DE PLOEY, J. & GABRIELS, D. 1980. Measuring soil loss and experimental studies. pp. 63-108. Soil erosion, Kirkby M.J. & Morgan, R.P.C.(ed.) J. Wiley. Chichester.
- EMMET, W.W. 1970. The hydraulics of overland flow on hillslopes, U.S. Geological Survey Professional Paper 662-A. U.S. Government Printing Office. 68 pags., Whashington D.C.
- ENGMAN, E. T. 1986. Roughness coefficients for routing surface runoff. pp. 39-53. ASCE.
- ESCRIBÁ BONAFÉ, D. 1988. Hidráulica para Ingenieros. pp. 16.14-16.15. Editorial Bellisco. Madrid.
- FOSTER G. R., JOHNSON C. B. & MOLDENHAUER, W. C. 1982. Hydraulics of failure of unanchored cornstalk and wheat straw mulches for erosion control. pp. 940-947. Transactions of the ASAE Vol 25, nº 4.
- GARCÍA DÍAZ, R. 2001. Modelización del flujo del agua en una ladera: Aplicación al caso de protección de la misma por la vegetación. 153 páginas, 2 planos y 6 páginas de fotografías. Tesis Doctoral. E.T.S. Ingenieros de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid.
- GARCÍA NAJERA, J. M. 1954. Pendientes máximas admisible en las tierras de cultivo y cálculo de las terrazas intermitentes con desagüe para la conservación del suelo (banquetas de infiltración). 29 páginas. I.F.I.E. Madrid.
- GARCÍA NAJERA, J. M. 1955. El bosque, el agua y la conservación del suelo, pendiente máxima admisible en pastizales. 7 páginas. I.F.I.E. Madrid
- JARRET, R. D. 1990. Hydrological and hydraulic resarch in mountain rivers. pp. 419-429. Water Resources Bulletin. A.W.R.A.

- KAO, D. T. Y. & BARFIELD, B. J. 1978. Predictions of flow hydraulics for vegetated channels. pp. 489-494. Transactions of the ASAE 21 (3).
- KAO, D. T. Y. & BARFIELD, B. J. 1982. Flow retardance in vegetated channels. pp 329-342. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. D.V. ASCE. IR2.
- NEZU, I. & ONITSUKA, K. 1999. 3-D Turbulent structures in partly vegetated open-channel flows. pp. 305-310. Environment Hydraulics. Lee, Jayawardena and Wang (eds). Balkema Rotterdam.
- REE, W. O., WINBERLEY, F. L. & CROW, F. R. 1977. Manning's n and the overland flow equation. pp. 89-95. Transacción of the ASAE. Vol 20, nº1.
- ROBINSON, A. R. & ALBERTSON, M. L. 1952 Artificial roughness standars for open channels. Transactions of the ASCE 33 (6).
- SANCHI, C., BENITO, G. & GUTIERREZ, M. 1991. Agujas de erosión y perfiladores microtopográficos. 28 páginas. Sociedad Española de Geomorfología. Logroño.
- TAYLOR, R. H. Jr & BROOKS, N. H. 1962. Discussion of resistance to flow in alluvial channels by D. B. Simons and E.V. Richardson. Part I. pp. 982-992. Transactions ASCE 127.
- TEMPLE, D. M. 1980. Tractive force design of vegetated channels linings. pp. 884-890. Transactions of the ASCE 23 (4).
- TEMPLE, D. M. 1982. Flow retardance of submerged grass channel linings. pp. 1300-1303. Transactions of the ASCE 25 (5).
- TEMPLE, D. M. 1983. Design of grass-lined open channels. pp. 1064-1069. Transactions of the ASCE.
- USDA, SOIL CONSERVATION SERVICE. 1954. Engineering Handbook Hydraulics. Sec 5.
- WOOLSHIER, D. A., HANSON, C. L. & KUHLMAN, A. R. 1970. Overland flow on rangeland watersheds. pp.336-356. Journal of Hydrology (NZ). Vol 9 No. 2.