

La pendiente de los depósitos en los torrentes del cerro Divisadero, Coyhaique, Chile

The deposit slopes at the Cerro Divisadero torrents, Coyhaique, Chile

C.D.O.: 116.7

ANDRES IROUME A. y JORGE GAYOSO A.

Instituto de Manejo Forestal, Universidad Austral de Chile, Casilla 853, Valdivia, Chile.

SUMMARY

The deposit bed slopes produced by the control structures built at the Cerro Divisadero torrents were studied. All the observed deposit slopes were found to be larger than the slope used for torrent control structure and systems design, which was estimated using empirical models. 30 channel profiles, taken upstream from check dams at Los Coigües and Los Saltos torrents were analyzed. In these profiles, equilibrium slopes were significantly correlated with the original stream bed slopes.

The fitted equations can be used to estimate deposit slopes for other torrent control projects in the area. These equations need to be verified in the future.

RESUMEN

Se estudiaron las pendientes de los depósitos de materiales de acarreo producidos por las obras de corrección construidas en los torrentes del cerro Divisadero, Coyhaique, XI Región. Todas las pendientes observadas resultaron ser superiores a la utilizada durante el diseño de los sistemas de corrección, la que fue calculada mediante la aplicación de fórmulas empíricas. En 30 tramos de cauces analizados, ubicados aguas arriba de diques de corrección en los torrentes Los Coigües y Los Saltos, la pendiente de los aterramientos después de la intervención resultó significativamente relacionada con la pendiente original de los cauces. Las ecuaciones obtenidas pueden servir para estimar las pendientes de los aterramientos en otros proyectos de corrección del área. Sin embargo, estas ecuaciones deberán ser verificadas en el futuro.

INTRODUCCION

La construcción de diques transversales para la corrección de torrentes permite consolidar el perfil longitudinal del cauce y el pie de las laderas (García y de Ayerbes, 1962; Benini, 1981; Hattinger, 1981). Los materiales acarreados por las aguas son retenidos por los diques, formándose depósitos o aterramientos que elevan el perfil natural del cauce aguas arriba de las estructuras. Estos depósitos adquieren una pendiente menor que la pendiente original del cauce, cuyo valor está ligado a la geometría del lecho torrencial, a la granulometría de los materiales y a las características hidráulicas de la corriente (Ferro, 1986).

La nueva pendiente corresponde a un estado de equilibrio dinámico, de modo que el volumen de material que deja una sección del cauce hacia aguas abajo es similar al que llega desde aguas arriba (Della Lucia *et al.*, 1980).

La localización de cada dique está determinada por la posibilidad de fundación existente en el cauce, la altura efectiva de la obra aguas abajo y la pendiente de esperada de los depósitos (Heede, 1976). Puesto que cada dique debe quedar emplazado en el punto donde termina el aterramiento del que se ubica inmediatamente aguas abajo, la correcta estimación de la pendiente que adquirirá el perfil del torrente luego de la intervención tiene una gran relevancia tanto técnica como económica (Della Lucia *et al.*, 1980; Della Lucia e Fattorelli, 1981).

El problema de estimar la pendiente de los depósitos ha sido abordado por numerosos autores, y los métodos propuestos se pueden clasificar en dos grandes grupos (Della Lucia *et al.*, 1980). El primero agrupa a los métodos basados en supuestos teóricos, y derivados de deducciones analíticas, observaciones empíricas o de experiencias sobre modelos, entre los que destacan los propues-

tos por Thierry (1981), Lelli (1928), Romiti y Romiti (1957), García y de Ayerbes (1962), Hampel (1977 a, b) y Ferro (1986). Gran parte de estos métodos están basados en el concepto de arrastre incipiente, y requieren para su aplicación de la cuantificación de parámetros en forma experimental en laboratorios o en terreno, o de la estimación de variables que son difícilmente definibles en un curso de agua torrencial, como es por ejemplo el radio hidráulico.

El segundo grupo considera los métodos derivados de observaciones y mediciones en cauces intervenidos, entre los que destacan los propuestos por Valentini (1895), Ferrell (1959), Heede (1960, 1976), Woolhiser y Lenz (1965), Ferrell y Barr (1963), Falciai *et al.* (1977, 1978), Della Lucia *et al.* (1980) y Della Lucia y Fattorelli (1981). Estos autores han encontrado relaciones entre la pendiente de los depósitos producidos después de la intervención del torrente, como variable dependiente, y algunas características del lecho (pendiente original, ancho), de los materiales arrastrados (dimensiones del material), de la corriente (radio hidráulico, caudal máximo) o de las estructuras (altura útil, separación), como variables independientes. Salvo algunas excepciones (Valentini, 1895; Falciai *et al.*, 1977, 1978), los resultados de los autores mencionados permiten concluir que la principal variable independiente, y en muchos casos la única, es la pendiente original del cauce.

Los métodos de este último grupo requieren, para su formulación, disponer de antecedentes sobre cauces torrenciales intervenidos (Della Lucia *et al.*, 1981; Heede, 1976). Esta situación no es común en Chile, donde tal vez el único sistema de diques de consolidación que se ha construido corresponde al del Proyecto de Corrección de Torrentes del Cerro Divisadero, ubicado cerca de la ciudad de Coyhaique en la XI Región (CONAF, 1974).

El catastro y la evaluación técnica de las obras de corrección de los torrentes del cerro Divisadero han proporcionado información respecto a características de las obras, del cauce y del sistema torrencial en general (Griott, 1991). Aprovechando esta información ha sido posible cuantificar la pendiente de los aterramientos y establecer relaciones entre éstas y la pendiente natural del cauce, la altura útil de los diques y el ancho del cauce.

En este trabajo se presentan los resultados de este análisis y de las relaciones obtenidas que pro-

porcionan un método confiable y de fácil aplicación para estimar las pendientes de los depósitos, el que puede servir en el diseño de futuros proyectos de corrección de torrentes que se requieren en el área.

AREA DE ESTUDIO

El área de estudio se enmarca dentro de las 1.779 ha que abarcó el Proyecto de Corrección de Torrentes del Cerro Divisadero, las que se ubican en la ladera N.O. del cerro, a 72° 4' Oeste y 45° 36' Sur (CONAF, 1974; Iroumé y Gayoso, 1991).

El clima en el área es del tipo continental transandino con degeneración esteparia (Casassa, 1985). La precipitación y la temperatura media anual son de 1.133 mm y 9° C, respectivamente (Griott, 1991).

En los sectores de menor altitud del área aparece la formación geológica Coyhaique que corresponde a sedimentos marinos, mientras que en las cumbres se hace presente la formación Divisadero que tiene carácter volcánico (CONAF, 1974; IREN, 1979). En las terrazas, donde se ubica la ciudad de Coyhaique, los suelos son de tipo trumao, y en los sectores más elevados del cerro Divisadero se presentan principalmente regosoles y latosoles.

La red de drenaje la forman cuatro torrentes: en el sector más oriental del cerro está el torrente El Carbón con una cuenca de 1.101 ha; en la parte central del cerro está el torrente Los Coigües, con una cuenca de 105 ha; a continuación está el torrente Los Saltos, con un área tributaria de 185 ha; finalmente está el torrente Mackay, que nace en la parte más occidental del cerro Divisadero y tiene un área tributaria de 293 ha. Los lechos de estos torrentes coinciden con las líneas de fallas geológicas, por lo que su poder erosivo es elevado (Espinoza, 1978).

Los torrentes Los Coigües, Los Saltos y Mackay han sido intervenidos desde el año 1975, después que una serie de aluviones ocurridos entre 1967 y 1974 afectaron zonas urbanas y rurales cercanas a la ciudad (Griott, 1991). De acuerdo a Iroumé y Gayoso (1991), entre 1975 y 1979 se construyeron 72 diques en los torrentes Los Coigües, Los Saltos y Mackay. De éstos, 24 son de manipostería de gaviones, 13 de manipostería de trozas y 35 de trozas preaterrados. Entre 1987 y 1988 se construyeron en el torrente Los Coigües tres diques adicionales: dos de manipostería de gaviones y uno de retenida parcial en perfiles metálicos.

MATERIAL Y METODO

Los tramos de lechos torrenciales seleccionados para el análisis corresponden a los ubicados aguas arribas de los diques construidos en los torrentes Los Coigües, Los Saltos y Mackay.

Durante el catastro realizado por Griott (1991) se midieron directamente las pendientes de los aterramientos, las alturas útiles de los diques y los anchos del cauce en los lugares de ubicación de estos últimos. Las pendientes originales del cauce fueron definidas a partir de los perfiles longitudinales de los torrentes realizados por CONAF (1974), y corroboradas con mediciones en terreno realizadas durante el mencionado catastro (Griott, 1991).

Puesto que se pretendía encontrar una relación entre la pendiente de los depósitos y algunas características de los cauces y de los diques, se eliminaron del análisis aquellos tramos que presentaban condiciones que pudieran alterar la pendiente de los aterramientos. Por esto no se consideraron los tramos ubicados aguas arriba de diques construidos con posterioridad a 1979, de diques que presentaban fallas estructurales y de los diques preaterrados. También se descartaron los sectores con aterramientos afectados por acumulación reciente de material proveniente de deslizamientos de laderas.

En el cuadro 1 se presentan los datos de los 30 tramos seleccionados, que se ubican en los torrentes Los Coigües y Los Saltos. En este cuadro se ha mantenido la numeración de los diques dada por Griott (1991) para facilitar su identificación.

La metodología empleada en este análisis está destinada a individualizar un modelo que permita expresar, mediante una ecuación matemática, la relación entre la pendiente de los depósitos J (como variable dependiente) y una o más variables independientes. Como variables independientes se han seleccionado:

- I = pendiente original del cauce
- H = altura útil del dique
- W = ancho del cauce en el lugar de ubicación del dique, medido a la altura del umbral del vertedero.

La selección de I, H y W se basó tanto en la calidad de los datos obtenidos por el catastro de Griott (1991), como por los resultados de análisis similares realizados por otros autores (Della Lucia

et al., 1981; Woolhiser y Lenz, 1965; Heede, 1960, 1976), que permiten concluir que son sin duda estas tres variables las que en mayor grado permiten predecir la pendiente de los aterramientos.

Para adaptar el modelo se utilizó en primer lugar la relación propuesta por Woolhiser y Lenz (1965):

$$J/I = \alpha + \sum_{i=1}^3 \beta(i) X(i) \quad (1)$$

Adicionalmente se consideraron los siguientes dos modelos:

$$J = \alpha + \sum_{i=1}^3 \beta(i) X(i) \quad (2)$$

$$J = \alpha \pi X(i)^{\beta(i)} \quad (3)$$

En las tres ecuaciones J es la pendiente de los depósitos, I o X (1) la pendiente original del cauce, X (2) la altura útil del dique, X (3) el ancho del cauce en la ubicación del dique y α y $\beta(i)$ los coeficientes de las regresiones. Los modelos de las ecuaciones 1 y 2 son lineales, y el modelo geométrico de la ecuación 3 lo es intrínsecamente puesto que es linealizable utilizando logaritmos.

RESULTADOS

Tal como se aprecia en el cuadro 1, la pendiente de los depósitos en los tramos analizados varió entre 3.2 y 17%, con una media de 9.8%. Estos valores son todos superiores al 2.2%, que fue la pendiente utilizada por CONAF (1974) durante el diseño de los sistemas de corrección para determinar la separación entre diques. Esta pendiente de diseño fue estimada a partir de la fórmula propuesta por García Nájera (García y de Ayerbes, 1961).

Esta subestimación de la pendiente de los aterramientos se debe, sin duda, a la gran dificultad de valorar en los cauces torrenciales del cerro Divisadero algunas de las variables requeridas por la fórmula de García Nájera, tales como caudal formador del lecho y concentración de sedimentos. Esta situación puede limitar la utilización de este tipo de modelos en el área del Divisadero.

CUADRO 1

Características de los tramos seleccionados

Characteristics of channel profiles selected

Torrente Los Saltos						Torrente Los Coigües					
Dique N°	Tipo	J %	I %	H m	W m	Dique N°	Tipo	J %	I %	H m	W m
1	MT	3.2	9.5	3.0	15.0	1	MT	8.2	21.2	3.0	12.0
2	MT	6.2	19.6	3.5	22.5	3	MT	14.0	23.8	3.2	16.1
3	MT	4.4	15.3	3.2	11.0	5	MT	11.7	25.9	2.8	14.0
4	MT	5.3	17.0	3.2	7.2	6	MG	13.7	28.7	2.5	8.6
5	MT	4.2	17.0	3.2	11.8	7	MG	17.0	31.4	2.7	6.8
6	MT	8.5	22.5	3.2	7.3	8	MG	9.4	25.9	3.0	7.7
7	MT	8.9	21.6	3.0	12.5	9	MG	11.0	21.7	3.0	7.8
8	MG	9.3	25.2	2.5	8.5	10	MG	14.0	28.3	3.0	7.9
10	MG	11.6	25.9	2.0	7.5	12	MG	12.4	27.3	3.0	8.0
11	MG	14.0	28.9	3.0	7.0	13	MG	6.9	19.6	3.0	7.8
12	MG	7.9	25.5	2.8	7.5	14	MG	11.3	28.1	1.5	6.0
13	MG	11.0	23.7	2.0	8.5						
14	MG	12.0	26.0	2.5	6.0						
15	MT	4.6	12.9	2.5	11.7						
16	MG	4.8	18.3	3.0	9.3						
17	MG	8.5	20.4	3.0	10.8						
19	MG	15.9	37.2	2.1	4.8						
21	MG	14.7	31.3	2.2	3.1						
22	MG	10.2	25.8	2.0	3.4						

N° = Número del dique según Griott (1991).

MT = Dique construido en manipostería de trozas.

MG = Dique construido en manipostería de gaviones.

La aplicación del modelo propuesto por Woolhizer y Lenz (1965) dio la siguiente relación para los 30 tramos considerados:

$$J/I = 0.5257 - 0.0396 H - 0.0012 W \quad (4)$$

Se aprecia en la ecuación 4 la escasa influencia de H y W sobre el cociente J/I. El valor del coeficiente de determinación de esta ecuación ($r^2 = 0.069$, cuadro 2) indica que el valor de J/I se reduce en la práctica a la constante a.

Considerando el modelo lineal de la ecuación 2, el resultado para los 30 tramos es el siguiente:

$$J = -5.532 + 0.6191 I - 0.025 H + 0.092 W \quad (5)$$

mientras que para el modelo geométrico de la ecuación 3 la relación es:

$$J = 0.0737 I^{1.507} H^{-0.133} W^{0.109} \quad (6)$$

En ambos casos el valor de r^2 (0.839 en ecuación 5 y 0.860 en ecuación 6, cuadro 2) es estadísticamente significativo a un nivel de confianza de 0.01. Sin embargo, los bajos coeficientes asociados a las variables H y W confirman los resultados obtenidos con el modelo propuesto por Woolhizer y Lenz (1965), en relación a que la influencia de estas variables sobre J es reducida, por lo menos para la situación del cerro Divisadero.

Considerando como única variable independiente a la pendiente original I, el resultado para los modelos lineal y geométrico es:

$$J = -3.954 + 0.586 I \quad (7)$$

$$J = 0.0966 I^{1.453} \quad (8)$$

Los coeficientes de determinación de las ecuaciones 7 y 8 son estadísticamente significativos a un nivel de confianza 0.01, y son sensiblemente similares a los de las ecuaciones 5 y 6. Esto

confirma a Heede (1976) y Fattorelli et al. (1981), entre otros, quienes afirman que la variación de J se explica principalmente por la variación de I. En la figura 1 se aprecia la relación entre J e I para los torrentes del cerro Divisadero.

De acuerdo a los estadígrafos que aparecen en el cuadro 2, tanto los modelos lineal y geométrico representados por las ecuaciones 7 y 8 permiten buenas estimaciones de la pendiente de los depósitos. Sin embargo, aunque la mejor relación corresponde al modelo descrito por la ecuación 8, se puede adoptar el modelo lineal de ecuación 7 por ser de más sencilla aplicación.

Forzando al modelo lineal simple a pasar por el origen, la ecuación 7 se transforma en:

$$J = 0.427 I \text{ o } J/I = 0.427 \tag{9}$$

El coeficiente de determinación (r^2) de la ecuación 9 es 0.767, y también es estadísticamente significativo a un nivel de 0.01. Por lo tanto, el cociente $J/I = 0.427$ puede adoptarse como primera aproximación para estimar las pendientes de los depósitos en el área.

Puesto que no hay antecedentes de otros proyectos de corrección de torrentes en Chile, el valor de $J/I = 0.427$ puede compararse con el de estudios realizados en el extranjero. De acuerdo con Heede (1966), el cociente J/I en torrentes de la vertiente oriental de las Rocky Mountains varía entre 0.5 y 0.65. Para los torrentes de la vertiente occidental de las Rocky Mountains este mismo autor (Heede, 1966) propone un valor de 0.7 para la razón J/I . Por otra parte, para el diseño de sistemas de diques de consolidación, el valor utilizado para el co-

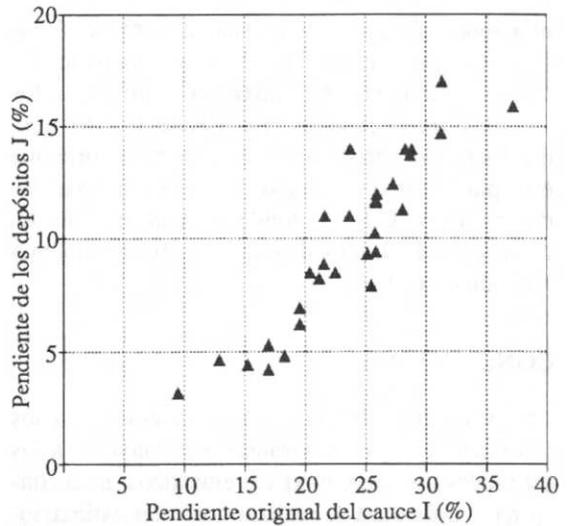


Fig 1. Pendientes en los torrentes del cerro Divisadero. Slopes at the Cerro Divisadero torrents.

eficiente J/I por el Los Angeles County Flood Control District es 0.7 (Ferrell, 1959; Ferrell y Barr, 1963), entre 0.5 y 0.75 por el Departamento de Corrección de Torrentes del Ministerio de Construcción del Japón (IWAO, s/f), y entre 0.50 y 0.77 por la Azienda Speciale di Sistemazione Montana de la Provincia Autónoma de Trento, Italia (Della Lucia et al, 1980).

De acuerdo a Della Lucia (1980), cocientes de J/I tan bajos como los obtenidos en este caso corresponderían a torrentes altamente erosionables, característica que representa la situación de los torrentes del cerro Divisadero.

Las ecuaciones obtenidas en este estudio deberán verificarse en el futuro, ya que, a pesar que las

CUADRO 2

Estadígrafos de los diferentes modelos

Statistics of the different models

Modelo	Variable		g.l.	F	Error estand. estimación	r^2
	Depend.	Indep.				
Woolhiser	J/I	H, W	27	1.013	0.0822	0.069 (NS)
Lineal	J	I, H, w	26	45.063	1.6015	0.839 (1)
Geométrico	J	I, H, w	26	53.457	0.0761	0.860 (1)
Lineal	J	I	28	138.831	1.5742	0.832 (1)
Geométrico	J	I	28	164.768	0.1724	0.855 (1)

(NS) : no significativo a un nivel $\alpha = 0.05$.

(1) : significativo a un nivel $\alpha = 0.01$

relaciones obtenidas son estadísticamente significativas, la edad de las obras al momento del catastro (12 años como máximo) es inferior a los 15 años recomendados por Heede (1976) para efectuar este tipo de análisis. Este autor propone este plazo como resultado de un estudio realizado en Texas, U.S.A., donde para un sistema de corrección de 9 años de edad no obtuvo ninguna relación entre J e I.

CONCLUSIONES

Las pendientes de los depósitos medidas en los torrentes del cerro Divisadero son mayores a las estimadas mediante modelos empíricos. Esto confirma la dificultad de realizar correctas estimaciones aplicando este tipo de modelos, ya que requieren de antecedentes tales como forma de las secciones, tipo y cantidad de los materiales de arrastre y caudales, entre otros, que son difícilmente medibles en cauces torrenciales.

Este estudio ha permitido encontrar relaciones simples entre las pendientes de los aterramientos y las pendientes originales de los cauces, que pueden servir para estimar las pendientes de diseño para la elaboración de proyectos de corrección de torrentes en el área.

Las relaciones deberán verificarse en el futuro, puesto que la edad de las obras al momento del catastro es inferior a los 15 años recomendados para efectuar este tipo de análisis.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a don Sigfried Griott B. y a la Corporación Nacional Forestal, quienes permitieron la realización de este estudio.

BIBLIOGRAFIA

BENINI, G. 1981. *Sistemazioni idraulico - forestali*. Tercera Ed. Cooperative Libreria Editrice Degli Studenti dell' Università di Padova, Padova, Italia, 217 pp.

CASASSA, G. 1985. "Clasificación del clima en la Región Austral de Chile", *Trapananda* 8 (5): 174-175.

CONAF. 1974. *Proyecto corrección de torrentes Cerro Divisadero*. Corporación Nacional Forestal, Santiago, Chile, 82 pp.

DELLA LUCIA, D., S. FATTORELLI, D. NARDIN, C. PROVASI y R. TOMASETTI. 1980. *Ricerca sulla determinazione della pendenza di compensazione nei torrenti del Trentino*. Azienda Speciale di Sistemazione Montana, Provincia Autonoma di Trento, Trento, 25 pp.

DELLA LUCIA, D. y S. FATTORELLI. 1981. "Nuovo metodo per la stima della pendenza dopo la sistemazione nei to-

renti del Trentino". En: *Proc. Convegno Internazionale su Problemi Idraulici nell'Assetto Territoriale della Montagna*. Milano, 13 pp.

ESPIÑOZA, G. 1978. *Situación actual de los deslizamientos de tierras en el cerro Divisadero*. Pontificia Universidad Católica de Chile, Centro de Capacitación para Ayudantes en Investigación, Santiago, Chile, 20 pp.

FALCIAI, M., A. GIACOMINI, G. SILVAGNI y G. TONNETTI. 1977. "Sul pendio di stabilimento di alcuni alvei torrentizi", *Annali Accademia di Scienze Forestali* 26: 107-130.

FALCIAI, M, G. CALAMINI y G. SILVAGNI. 1978. "Ricerca sul pendio di stabilimento di alcuni torrenti della Val de Sieve e dell'alto Amo", *L'Italia Forestali e Montana* 33 (6): 257-267.

FERRELL, W.R. 1959. *Report on debris reduction studies for mountain watersheds*. Los Angeles County Flood Control District, Los Angeles, 164 pp.

FERRELL, W.R. y W.R. BARR. 1963. "Criteria and methods for use of check dams in stabilizing channel banks and beds". En: *Proc. Federal Inter-Agency Sediment Conference*. USDA Miscellaneous Publication 970: 376-386.

FERRO, V. 1986. "Sulla pendenza di equilibrio nel tratto montano di un corso d'acqua", *Quaderni di Idronomia Montana* 6: 39-68.

GARCIA, J. y J. DE AYERBES. 1962. *Principios de hidráulica torrencial y corrección de aludes*. Instituto Forestal de Investigación y Experiencias, Madrid, España, 350 pp.

GRIOTT, S. 1991. *Evaluación técnica de las obras de corrección de torrentes del Cerro Divisadero*. Tesis, Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales, Valdivia, Chile, 125 pp.

HAMPEL, R. 1977a. "Geschiebewirtschaft in Wildbachen (1)", *Wildbach und Lawinenverbau* 41 (1): 3-34.

HAMPEL, R. 1977b. "Geschiebewirtschaft in Wildbachen (2)", *Wildbach und Lawinenverbau* 41 (2): 53-144.

HATTINGER, H. 1981. *Corrección de torrentes. Manual II: Hidráulica torrencial y obras de Ingeniería*. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales, Mérida, Venezuela, 50 pp.

HEEDE, B. 1960. "Study of early gully-control structures in the Colorado Front Range", *USDA For. Ser.*, Station Paper N° 55, 42 pp.

HEEDE, B. 1966. "Design, construction and cost of rock check dams", *USDA Forest Ser.*, Research Paper RM-20, 24 pp.

HEEDE, B. 1976. "Gully development and control: The status of our knowledge", *USDA Forest Ser.*, Research Paper RM-169, 42pp.

IREN. 1979. *Perspectivas de desarrollo de los recursos de la Región Aysén*. Corporación de Fomento de la Producción, Santiago, Chile, 507 pp.

IROUME, A. y J. GAYOSO. 1991. "Evaluación de las obras y sistemas de corrección de torrentes del Cerro Divisadero, Coyhaique, XI Región", *Bosque* 12 (1): 27-35.

IWAO, s/f. *Sabo hydraulics*. Sabo Department, Ministry of Construction, Tokyo, 106 pp.

LELLI, M. 1928. "La regolazione dei corsi d'acqua naturali", *Annalidei Lavori Pubblici* 66 (2): 150-158.

ROMITI, G. e A. ROMITI. 1957. *Sistemazione dei bacini montani*. UTET, Torino, 193 pp.

THIERRY, E. 1891. *Restauration des montagnes, correction des torrents, reboisement*. Baudry et C. Libraires Editeurs, Paris.

VALENTINI, C. 1895. "Del modo di determinare il profilo di compensazione e sua importanza nelle sistemazioni idrauliche", *Il Politecnico* 43 (4): 217-224.

WOOLHISER, D.A. y A.T. LENZ 1965. "Channel gradients above gully-control structures", *J. of the Hydraul. Div.*, Proc. of the ASCE, 91 (HY 3): 165-187.