



Roberto Pizarro T., Juan Pablo Flores V., Claudia Sangüesa P.,
Enzo Martínez A., José Luis García Rodríguez



DISEÑO DE OBRAS PARA LA CONSERVACIÓN DE AGUAS Y SUELOS

Proyecto marco: 00C7FT-08
“Determinación de estándares de ingeniería en obras de conservación y aprovechamiento de aguas y suelos para la mantención e incremento de la productividad silvícola”

Financiamiento:
Fondo de Desarrollo e Innovación de la Corporación de Fomento de la Producción, CORFO, Chile

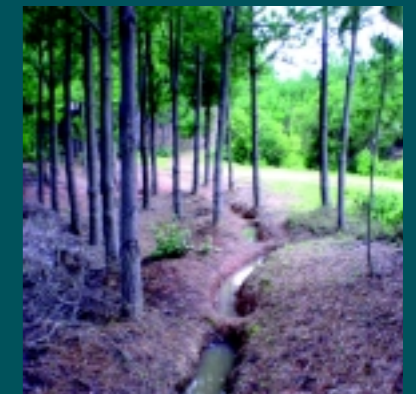
Sociedad de Estándares de Ingeniería para Aguas y Suelos Ltda., sociedad conformada por:

Universidad de Talca
Bosques de Chile S.A.
Terranova S.A.
Bosques Villanueva Ltda.

Instituciones asociadas:

Instituto Forestal
Banestado Microempresas S.A.
Corporación Nacional Forestal
Dirección General de Aguas
Forestal Celco S.A.
Prodecop - Secano
Universidad Politécnica de Madrid

DISEÑO DE OBRAS PARA LA CONSERVACIÓN DE AGUAS Y SUELOS



Roberto Pizarro Tapia
Juan Pablo Flores Villanelo
Claudia Sangüesa Pool
Enzo Martínez Araya
José Luis García Rodríguez

Manual de opciones tecnológicas
DISEÑO DE OBRAS PARA LA CONSERVACIÓN
DE AGUAS Y SUELOS

PROYECTO EDI - CORFO
Determinación de Estándares de Ingeniería en Obras de
Conservación y Aprovechamiento de Aguas y Suelos,
para la Mantención e Incremento de la Productividad Silvícola.

Sociedad Estándares de Ingeniería para Aguas y Suelos Ltda.,
está conformada por:

Universidad de Talca
Bosques de Chile S.A.
Terranova S.A.
Bosques Villanueva Ltda.

Instituciones asociadas:

Instituto Forestal (INFOR)
Banestado Microempresas S.A.
Corporación Nacional Forestal (CONAF)
Dirección General de Aguas (DGA)
Forestal Celco S.A.
Prodecop - Secano
Universidad Politécnica de Madrid

Registro de Propiedad Intelectual N°

ISBN

Talca, Chile, Octubre 2004

Diseño de Portada
Marcela Alborno Dachelet

Diagramación
Mabel Urrutia Olave

Corrección de textos
María Cecilia Tapia Castro

Impresora Contacto Ltda.
Impreso en Chile



DISEÑO DE OBRAS PARA LA CONSERVACIÓN DE AGUAS Y SUELOS

**Roberto Pizarro Tapia
Juan Pablo Flores Villanelo
Claudia Sangüesa Pool
Enzo Martínez Araya
José Luis García Rodríguez**

Dedicado a

Nuestras familias, padres, hijos(as) y amigos(as) de la cátedra de hidrología
de la Universidad de Talca

Índice

	Pág.
Prólogo	11
Introducción	13
Capítulo 1: Los principales conceptos hidrológicos	19
Capítulo 2: Las zanjas de infiltración	33
Capítulo 3: Los canales de desviación de aguas lluvias	51
Capítulo 4: Obras de retención de sedimentos y corrección de cauces (Diques)	67
Capítulo 5: Algunos estándares de construcción	99
Capítulo 6: Otras obras de conservación y aprovechamiento de aguas y suelos	109
Consideraciones finales	115
Referencias bibliográficas	119
Glosario	123
Anexos	135

Índice de Cuadros

Cuadro 1	Desertificación del país a nivel de comunas	14
Cuadro 2	Evolución de los montos bonificados por obras de recuperación de suelos	16
Cuadro 3	Alturas máximas de precipitación (mm) asociadas a 1 hora	21
Cuadro 4	Intensidades máximas horarias anuales de precipitación (mm/h)	22
Cuadro 5	Determinación de la velocidad de infiltración de los suelos	29

Cuadro 6	Tasas de infiltración para diferentes texturas de suelos	30
Cuadro 7	Características de los sitios experimentales seleccionados en la VI Región	41
Cuadro 8	Características de los sitios experimentales seleccionados en la VII Región	42
Cuadro 9	Características de los sitios experimentales seleccionados en la VIII Región	42
Cuadro 10	Características físicas presentes en los ensayos	43
Cuadro 11	Componentes nutricionales presentes en los ensayos por regiones	44
Cuadro 12	Distanciamiento óptimo entre líneas de zanjas, según diseño hidrológico	44
Cuadro 13	Rendimiento de las obras de construcción de zanjas de infiltración	47
Cuadro 14	Intensidades máximas de precipitación (mm/h), en cada zona de estudio	48
Cuadro 15	Coefficiente de escorrentía para ser usados en el método racional (Q = CIA)	55
Cuadro 16	Velocidades máximas permitidas en canales	58
Cuadro 17	Pesos específicos para distintos materiales	79
Cuadro 18	Valores de rozamiento en cimentación en distintos tipos de materiales	85
Cuadro 19	Valores del coeficiente f, para estimar la longitud del zampeado	89
Cuadro 20	Cálculo de fuerzas, brazos y momentos para un dique	95
Cuadro 21	Recomendaciones para zanjas de infiltración	99
Cuadro 22	Recomendaciones para canales de desviación	101
Cuadro 23	Evaluación del crecimiento de las plantaciones de <i>Pinus radiata</i> (D.Don)	102
Cuadro 24	Test de Kruskal-Wallis	104
Cuadro 25	Sobrevivencia promedio de los tratamientos	106
Cuadro 26	Costo por m ³ construido de zanjas de infiltración	107
Cuadro 27	Resultado del Test de Duncan en la medición de la altura, con un 99% de confianza	115
Cuadro 28	Valores críticos de «D» en la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov	140
Cuadro 29	Intensidades de precipitación (mm/h). Estación Pencahue	143
Cuadro 30	Parámetro k. Estación Pencahue	143
Cuadro 31	Tabla con coeficientes de rugosidad (n) según Horton	144

Índice de Gráficos

Gráfico 1	Superficie bonificada por obras de recuperación de suelos degradados y forestación (Años 2000 - 2002)	15
Gráfico 2	Gráfico de las Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia	19
Gráfico 3	Curva de Infiltración (método del cilindro)	30
Gráfico 4	Comparación de crecimiento con distintas técnicas de conservación de aguas y suelos en un año en <i>Pinus radiata</i> (D.Don), (Microcuenca del Estero Barroso, VII Región)	35
Gráfico 5	Determinación de la intensidad de diseño (I_d), a partir del tiempo de concentración (T_c)	76
Gráfico 6	Muestreo de plantas 1 año (marzo, 2002 - marzo, 2003)	105

Índice de Figuras

Figura 1	Vista transversal de una zanja en la ladera	33
Figura 2	Perfil de una zanja de infiltración	36
Figura 3	Disposición de las zanjas en el terreno	38
Figura 4	Bosquejo de la plantación sobre el camellón	39
Figura 5	Canal de desviación de aguas lluvias (forma trapecial)	52
Figura 6	Sección transversal de un canal trapecial	53
Figura 7	Área de impluvio (A)	57
Figura 8	Situaciones en que es necesaria la construcción de un canal de desviación de aguas lluvias	60
Figura 9	Sección transversal de un canal	60
Figura 10	Distanciamiento entre el canal y el inicio de una cárcava	61
Figura 11	Camellón de tierra	61
Figura 12	Faenas de limpieza del canal	62
Figura 13	Estabilización de un canal con plantas herbáceas	63
Figura 14	Configuración geométrica de los parámetros hidráulicos del canal de Paredones (VI Región)	65
Figura 15	Configuración geométrica de los parámetros hidráulicos del canal de Llanillos (VII Región)	65
Figura 16	Disposición de diques en ladera	68
Figura 17	Mejoras en el talud de un dique	69
Figura 18	Empotramiento de un dique	69

Figura 19	Construcción de un muro de contención de sedimentos	70
Figura 20	Vertedero de un dique	70
Figura 21	Disposición correcta de un dissipador de energía	70
Figura 22	Dique de polines con sacos de arena o tierra	71
Figura 23	Formas geométricas de un dique	73
Figura 24	Dique con paramento aguas arriba vertical	74
Figura 25	Espesor en coronación	77
Figura 26	Tipos de vertederos	77
Figura 27	Dique, condición sin aterramiento	80
Figura 28	Dique, condición con aterramiento	80
Figura 29	Cuenca amortiguador sumergido (caída libre)	88
Figura 30	Cuenca amortiguador formado por un contradique, al pie de un dique (se supone caída libre)	88
Figura 31	Análisis de fuerzas de un dique	93
Figura 32	Longitud de la cimentación de un dique	94
Figura 33	Sección transversal de un canal trapecial	141

Índice de Fotografías

Fotografía 1	Cilindro infiltrómetro	28
Fotografía 2	Método del cilindro (en terreno).	29
Fotografía 3	Erosión de cárcava en el sector de Manzanares, VIII Región	33
Fotografía 4	Erosión de cárcava en el sector de Cavilolén, IV Región	33
Fotografía 5	Actividades de mantención de las obras	34
Fotografía 6	Instrumento: Nivel en A	38
Fotografía 7	Faenas de construcción de zanjas de infiltración	39
Fotografía 8	Plantación de <i>Pinus radiata</i> (D.Don) en sectores con zanjas de infiltración	39
Fotografía 9	Diseño ensayo Pumanque, VI Región (Intensidad máxima de precipitación = 18,8 mm/h)	45
Fotografía 10	Diseño ensayo Name, VII Región (Intensidad máxima de precipitación = 17,9 mm/h)	45
Fotografía 11	Diseño ensayo Manzanares, VIII Región (Intensidad máxima de precipitación = 19,0 mm/h)	46
Fotografía 12	Funcionamiento de las zanjas de infiltración en Pumanque, VI Región	48

Fotografía 13	Funcionamiento de las zanjas de infiltración en Name, VII Región	49
Fotografía 14	Funcionamiento de las zanjas de infiltración en Manzanares, VIII Región	49
Fotografía 15	Zonas semiáridas de Chile Central	51
Fotografía 16	Erosión de cárcava en Paredones, VI Región	51
Fotografía 17	Vista transversal del ensayo: Control de cárcava (Paredones, VI Región)	51
Fotografía 18	Molde de construcción de canales	61
Fotografía 19	Módulo experimental de Paredones (VI Región)	63
Fotografía 20	Módulo experimental de Llanillos (VII Región)	63
Fotografía 21	Dique de mampostería en seco (V Región)	71
Fotografía 22	Dique de mampostería hidráulica (V Región)	71
Fotografía 23	Dique de postes impregnados (VIII Región)	72
Fotografía 24	Filtración	72
Fotografía 25	Desempotramiento	72
Fotografía 26	Socavamiento	72
Fotografía 27	Taludes inestables aguas abajo de un dique	72
Fotografía 28	Desmoronamiento de taludes aguas arriba del dique	73
Fotografía 29	Ubicación de un dique (mampostería hidráulica) en una quebrada.	74
Fotografía 30	Disposición de diques consecutivos para el control de torrentes	97
Fotografía 31	Corrección de torrentes	98
Fotografía 32	Construcción de diques (Paramento aguas abajo)	98
Fotografía 33	Construcción de diques (Paramento aguas arriba)	98
Fotografía 34	Diques con mechinales	98
Fotografía 35	Día de campo con pequeños propietarios en ensayo Name, VII Región	104
Fotografía 36	Vista del ensayo Name, VII Región	104
Fotografía 37	Gaviones (V Región)	110
Fotografía 38	Muretes de contención de sedimentos	110
Fotografía 39	Empalizadas (VII Región)	110
Fotografía 40	Fajinas en ladera (VIII Región)	111
Fotografía 41	Construcción de microterrazas (VII Región)	111
Fotografía 42	Funcionamiento de la microterrazza asociada a una plantación (VII Región)	112
Fotografía 43	Faena de subsolado a 5 metros de espaciamiento entre líneas. (Manzanares, VIII Región)	112
Fotografía 44	Plantación de <i>Pinus radiata</i> (D.Don) con zanjas de infiltración (7 años), Llongocura, VII Región	116

Prólogo

La restauración de los ambientes degradados es una aspiración que si bien se veía con cierta desesperanza en las últimas décadas del siglo XX, se ha convertido paulatinamente en un objetivo que las sociedades modernas demandan cada vez con mayor fuerza. Sin embargo, ello no es tarea fácil: para llevarla a cabo de una forma adecuada se debe tener en cuenta el grave nivel de degradación que en el transcurso de los siglos han sufrido los ecosistemas. Afortunadamente, las tecnologías que de forma progresiva se van desarrollando se muestran cada vez más eficientes en el objetivo de conseguir tal restauración.

El nivel utópico de la restauración idéntica del estado inicial debemos asumir que es inalcanzable en prácticamente todos los casos, por la imposibilidad de recorrer de nuevo la milenaria secuencia de escenarios, muchos de ellos aleatorios, que dieron lugar a las condiciones iniciales. Sí que es posible casi siempre una mejora de las condiciones de biodiversidad, estructura, dinámica y funcionamiento de aquellos ecosistemas alterados antrópicamente, por medio de tecnologías adecuadas para su recuperación o su rehabilitación.

En este contexto, el presente libro da a conocer una serie de técnicas destinadas a conseguir una disminución de los procesos erosivos de carácter hídrico en un territorio. Asimismo, tiene la pretensión de contribuir a que la aplicación de tales tecnologías favorezca la infiltración del agua en los suelos, incrementando así las posibilidades de conseguir una mejor restauración de la vegetación y del paisaje, dadas las mejores condiciones ambientales instauradas.

Se describen tanto tecnologías desarrolladas por la vertiente europea de la ingeniería forestal, como tecnologías propias, generadas y desarrolladas por ingenieros chilenos, aplicadas en un amplio espectro de ecosistemas.

Es por ello que es deseable y previsible que su utilización sea muy amplia, especialmente en los países de América Latina y el Caribe. Cada técnica está ejemplificada, lo que permite al lector hacerse una idea muy adecuada acerca de cómo elegir la mejor en cada caso y cómo implementar diseños hidrológicos confiables en un medio cambiante.

En un país como Chile, cuya accidentada geografía genera condiciones muy favorables para la aparición de graves fenómenos erosivos, debe apoyarse sin reservas el que se lleven a cabo iniciativas destinadas a revertir en el menor plazo posible tales fenómenos, iniciativas de las que esta publicación es un ejemplo excelente y precursor.

El libro que tiene en sus manos es el resultado de un proceso de investigación y síntesis del valioso y entusiasta equipo de Hidrología de la Universidad de Talca, Chile, equipo que, una vez más, entrega a la comunidad técnica y científica del país y de América Latina un documento concreto, de gran relevancia práctica.

Que este trabajo, aglutinador de tecnologías para evitar procesos físicos indeseables y que contribuyan a restaurar territorios frágiles y dañados por la acción antrópica, sea puesto a disposición para su aplicación efectiva, es algo que, en buena ley, deben agradecer todos los que se preocupan por el futuro sostenible de los recursos naturales y por la preservación del irreparable paisaje chileno.

Es esa una ingente tarea por hacer, que agradecerán las futuras generaciones de ciudadanos, y a la que merece la pena dedicar el esfuerzo ilusionado de una vida profesional.

Santiago González Alonso

Dr. Ingeniero de Montes, Catedrático de la Universidad Politécnica de Madrid
Director del Proyecto FODEPAL. FAO, Naciones Unidas - AECI, Agencia Española de Cooperación Internacional
MIEMBRO CORRESPONDIENTE DE LA REAL ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y
NATURALES DE ESPAÑA

Introducción

La erosión de los suelos en Chile es considerada uno de los problemas ambientales más significativos del sector silvoagropecuario. Asimismo, dicha problemática está asociada a una disminución de la productividad y eficiencia de los suelos, la cual es provocada por una baja retención tanto del agua como del suelo, y cuya tendencia a escurrir se manifiesta en mayor medida en terrenos con pendientes pronunciadas.

En este sentido, la conservación de aguas y suelos es un aspecto que involucra a distintos sectores productivos e institucionales como el agrícola, el forestal, el pecuario y el de infraestructura, entre otros. Ello es así, porque ambos recursos, suelo y agua, constituyen elementos fundamentales para la aplicación de esquemas productivos sustentables de desarrollo.

La preocupación de diversas organizaciones ambientales e instituciones gubernamentales, radica en que gran parte de los terrenos productivos del país tienen algún grado de erosión. Así, de las 75.707.366 hectáreas que comprende la superficie continental del país, sólo 5.271.580 (6,9%) son arables, mientras que 26.393.219 hectáreas (34,9%) poseen potencial silvoagropecuario; sin embargo, las cifras de desertificación, revelan que la superficie total de suelos erosionados alcanza a 34,5 millones de hectáreas, de las cuales un 80,5% presenta categorías de erosión moderada a muy grave.

En este contexto, existen 56 comunas entre las regiones IV y IX, afectadas por una desertificación grave y 66 por una erosión moderada, a lo que ha contribuido de forma primordial el mal uso de los recursos suelo y agua (Soto, 1997). El siguiente cuadro (1) da cuenta de la situación de la desertificación del país a nivel de comunas.

Cuadro 1. Desertificación del país a nivel de comunas

Regiones	Comunas Analizadas	Grave	Moderada	Leve	No Afectada
I	10	2	5	2	1
II	9	4	2	2	1
III	9	2	7	0	0
IV	15	8	6	1	0
V (*)	35	14	19	2	0
RM (*)	10	3	2	5	0
VI	33	3	10	8	12
VII	29	8	5	13	3
VIII	49	9	10	30	0
IX	30	11	14	5	0
X	42	1	23	18	0
XI	10	6	2	0	2
XII	9	5	3	0	1
Totales	290	76	108	86	20
%	100	26	37	30	7

(*) No se incluyen comunas netamente urbanas: 2 en la V Región y 40 en la Región Metropolitana.

Fuente: Mapa Preliminar de la Desertificación en Chile (Soto, 1997)

Ante esta situación, el Estado de Chile ha implementado varios programas destinados a detener y/o revertir los procesos de desertificación y degradación de los suelos, entre ellos, el Programa de Acción Nacional Contra la Desertificación (PANCD), el Programa para la Recuperación de Suelos Degradados de la Corporación Nacional Forestal (CONAF), a través del Decreto Ley N° 701, y el Sistema de Incentivos para la Recuperación de Suelos Degradados (SIRSD) coordinado por el Servicio Agrícola Ganadero (SAG), el Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP) y la Subsecretaría de Agricultura de Chile. Pero, es la promulgación y aprobación de la Ley N° 19.561 de fomento forestal, la que está incentivando a pequeños propietarios a incorporar técnicas de recuperación de suelos en las plantaciones forestales, mayoritariamente exóticas, permitiendo con ello, una efectiva disminución de los procesos erosivos. Dicha ley bonifica un porcentaje de los costos netos que se señalan en la tabla de costos de construcción de obras de recuperación de suelos, definida por CONAF, y que tienden a disminuir la erosión en terrenos previamente calificados, conforme a dicho texto legal (ver anexo I).

De esta manera, las bonificaciones han cumplido un rol significativo para la

pequeña propiedad agrícola y forestal, consolidándose en el tiempo como una sustantiva herramienta de financiamiento, a la vez que ha favorecido la protección de suelos frágiles o en proceso de erosión. En este contexto, se pueden observar los siguientes resultados, en el gráfico 1.

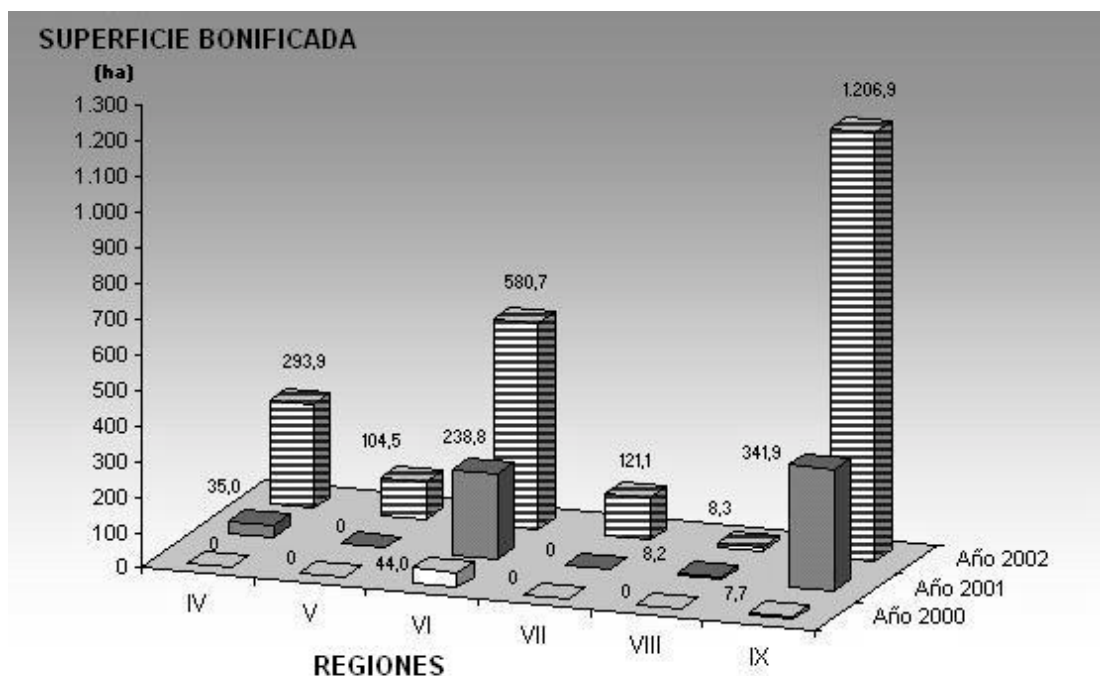


Gráfico 1. Superficie bonificada por obras de recuperación de suelos degradados y forestación (Años 2000 - 2002)

Fuente: Corporación Nacional Forestal

La IX Región de la Araucanía, el año 2002, registra las mayores superficies bonificadas del país con 1.206,9 hectáreas, seguida muy atrás por la VI Región del Lib. Bernardo O'Higgins (580,7 hectáreas), la IV Región de Coquimbo (293,9 hectáreas) y la séptima Región del Maule (121,1 hectáreas).

En este contexto, el cuadro 2 muestra la evolución creciente de los montos bonificados durante el período 2000 - 2002, por concepto de la recuperación de suelos degradados y la forestación. En particular, las regiones IX y VI poseen los mayores montos bonificados con 559,8 y 320,9 millones de pesos, respectivamente.

Cuadro 2. Evolución de los montos bonificados por obras de recuperación de suelos

Región	Año 2000	Año 2001	Año 2002
IV	0	17.753.742	113.757.985
V	0	0	50.212.363
VI	20.333.256	104.240.925	320.898.078
VII	0	0	46.659.353
VIII	0	4.250.655	3.549.331
IX	2.665.766	142.938.077	559.842.917
X	0	0	0
XI	0	0	0
Total	22.999.022	269.183.399	1.094.920.027

De esta forma, el apoyo estatal a los pequeños propietarios forestales, hace posible maximizar la sustentabilidad de proyectos de forestación desde un punto de vista ambiental, económico y social.

Pero sin duda, el atractivo más importante a la hora de incorporar estas técnicas de conservación de aguas y suelos, radica en el significativo incremento en la productividad de las plantaciones forestales. Un estudio de la Universidad de Talca, 1998, demostró que en una plantación de *Pinus radiata* (D.Don) de 7 años de edad, que incorporó técnicas de conservación y se ubica en el secano costero de la VII Región, el volumen por hectárea supera en casi 400% a una plantación testigo, de igual edad y hecha en el mismo sitio, pero que no cuenta con tales técnicas. Un estudio posterior, muestra que la plantación con técnicas, denotaría en promedio un 62% más de volumen que la plantación testigo, después de 20 años de rotación. Asimismo, el incremento volumétrico no afectaría las propiedades de la fibra por ser éstas función de las características genéticas (Zamudio, 2001), razón por la cual las propiedades de la madera no son alteradas, en general, por un mayor crecimiento (Cuevas, 2001).

Por otra parte, la construcción de obras de conservación de aguas y suelos en el país, ha estado marcada por procesos relacionados con la eventualidad de fenómenos o eventos aleatorios, bajo los cuales se producen pérdidas, principalmente económicas. Así, y a partir de estos eventos, normalmente se generan demandas sociales de la población o las autoridades locales, con el fin de mitigar las consecuencias de crecidas de ríos con sus correspondientes desbordes, inundaciones y socavación de riberas, movimientos en masa, como aludes y deslizamientos de tierra, cortes de caminos, procesos erosivos con pérdida de la fertilidad de los suelos, generación de cárcavas, etc.

Cabe considerar que, las obras de conservación de aguas y suelos se transforman en importantes absorbedoras de mano de obra en épocas de alto nivel de cesantía, toda vez que la mayoría de ellas se llevan a cabo, generalmente, con personal no capacitado y escasas herramientas. Por consiguiente, no sólo cumplen un rol económico, sino también social.

Generalmente, estos programas sociales son coordinados por la Corporación Nacional Forestal (CONAF), aunque lo hace con un conjunto de trabajadores que, en muchos casos, dista de ser el más idóneo para estas actividades, ya que en su mayoría no posee la experiencia en el tema y asume estas tareas como una oportunidad de contar con un trabajo, lo que distorsiona los rendimientos de faenas y la efectividad de las obras (Pizarro et al, 2004).

Asimismo, estas obras generalmente deben realizarse con el mismo personal técnico con que cuenta CONAF, por lo cual éste se recarga de trabajo y no cuenta con el tiempo y los recursos para llevar a cabo diseños de ingeniería para este tipo de obras, salvo la experiencia que varios ingenieros ya poseen sobre el tema.

En este contexto, y analizando gran parte de las obras llevadas a cabo en el país dirigidas a la conservación de aguas y suelos, surge la pregunta acerca del diseño a que son sometidas estas obras, hecho que debería incluir aspectos ligados a la temática hidrológica, hidráulica y de suelos, dado que los procesos erosivos están determinados por el comportamiento de las precipitaciones y, específicamente de la intensidad, por una parte; y por la proporción de escorrentía superficial que se genera en un suelo como producto del proceso precipitación-escorrentía.

Por ello, se visualiza que principalmente, para las obras de conservación de aguas y suelos, obras que son de una envergadura media a pequeña, no existen estándares de ingeniería para su diseño, ni tampoco se usan elementos de ingeniería hidrológica, y la ejecución de las mismas, normalmente pasa por criterios empíricos de indudable valor, pero que no siempre son suficientes para soportar las sollicitaciones mecánicas a que las obras son sometidas.

El proyecto «Determinación de Estándares de Ingeniería en Obras de Conservación y Aprovechamiento de Aguas y Suelos, para la Mantención e Incremento de la Productividad Silvícola», que cuenta con financiamiento del Fondo de Desarrollo e Innovación, FDI - CORFO, y que es administrado por la Sociedad Estándares de Ingeniería para Aguas y Suelos (EIAS), tiene como objetivo principal, la obtención de estándares de ingeniería hidrológica para la construcción de obras de conservación de aguas y suelos.

Este diseño está basado en el análisis de variables hidrológicas y edáficas, con lo cual se espera incrementar la productividad de los suelos de aptitud preferentemente forestal de las regiones VI, VII y norte de la VIII, mediante un diseño óptimo y al menor costo posible.

En función de lo expuesto, la Sociedad Estándares de Ingeniería para Aguas y Suelos Ltda., elabora el presente manual «**DISEÑO DE OBRAS PARA LA CONSERVACIÓN DE AGUAS Y SUELOS**», que tiene por objetivo ofrecer nuevas tecnologías de conservación y aprovechamiento de aguas y suelos, que permitan actuaciones más acordes con el medio ambiente físico y social, y que hagan posible acercarse hacia un desarrollo sostenible.

El presente libro muestra una descripción técnica y económica de las obras de conservación de aguas y suelos, como una opción tecnológica válida, para la utilización de dichas técnicas en terrenos con problemas de degradación de suelos y en lugares donde la escasez de recursos hídricos dificulta el establecimiento y desarrollo de cultivos agrícolas y de masas silvícolas.

Asimismo, se añade a la descripción de las obras un enfoque que contempla el marco legal de la Ley de Fomento Forestal N° 19.561, dado que esta ley constituye el principal referente para la implementación de dichas obras, de tal forma que ha logrado incentivar, eficientemente, el uso de las técnicas de conservación.

Capítulo 1: Los principales conceptos hidrológicos

El diseño de las obras de conservación y aprovechamiento de aguas y suelos, debe considerar previamente cuatro conceptos hidrológicos, a saber: período de retorno, un análisis de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia, la velocidad de infiltración de los suelos y el coeficiente de escorrentía, para así, diseñar las obras que favorecen la infiltración de aguas lluvias en condiciones desfavorables.

EL PERÍODO DE RETORNO (T)

Uno de los primeros requerimientos a considerar es la determinación del periodo de retorno T. Éste puede ser definido como el tiempo que transcurre entre dos fenómenos de las mismas características, el cual se define por la siguiente expresión (1):

$$T = \frac{I}{I - F(X)} \quad (1)$$

Donde:

F(X) : función de distribución de probabilidad.

Con esto, es posible tener un horizonte probabilístico de planificación, dentro del cual no debería, teóricamente, presentarse un evento con precipitaciones superiores a la calculada (Pizarro y Novoa, 1986).

LAS CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA (IDF)

Otro elemento importante, para la determinación de la intensidad de precipitación de diseño, es la construcción de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF). Estas curvas resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno (Témez, 1978). Para ello, se debe conocer el comportamiento de las precipitaciones a través de una curva que entrega la intensidad media en función de la duración y la frecuencia, y cuya única finalidad será la de aportar patrones de conductas de las lluvias (Gráfico 2).

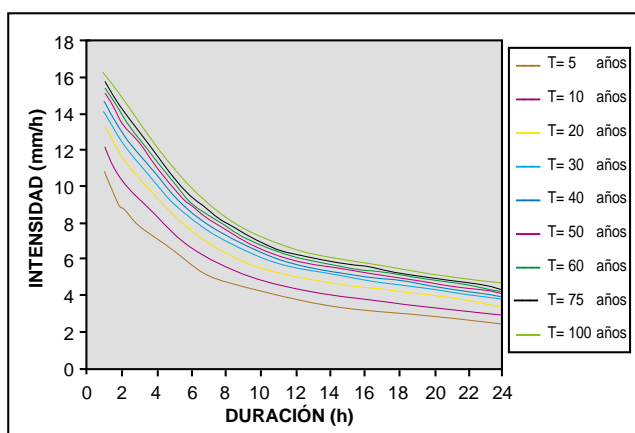


Gráfico 2. Gráfico de las Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia

Es importante señalar, que cuando sólo se dispone de un pluviómetro en una estación, es evidente que, en general, sólo se podrá conocer la intensidad media en 24 horas. Como se comprenderá, esta información puede inducir a grandes errores por defecto, por cuanto las lluvias de corta duración son, en general, las más intensas. Es natural, entonces, que las determinaciones de intensidades de lluvia se hagan a partir de los registros proporcionados por los pluviógrafos (Aros, 1997).

La construcción de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), según diversos autores, plantea distintas formas o métodos para su elaboración. Este capítulo presenta la construcción planteada por Témez (1978), el cual relaciona las intensidades de precipitación para distintos períodos de retorno, con el propósito de graficar la relación entre las tres variables (Intensidad-Duración-Frecuencia), y cuyo esquema fundamental de la curva IDF, responde a la siguiente expresión matemática de la intensidad de la lluvia (2):

$$I = \frac{P}{D} \quad (2)$$

Donde;

I : Intensidad de precipitación máxima (mm/h).

P : Profundidad de lluvia en milímetros (mm).

D : Duración, dada usualmente en horas (h).

La construcción de las curvas IDF, contempla los siguientes pasos:

Paso 1: Selección de las estaciones pluviográficas

El criterio de selección de las estaciones pluviográficas se basa en el tipo, cantidad, calidad y periodicidad de los datos.

Paso 2: Recolección de la información requerida

Los datos pluviométricos necesarios para el desarrollo de las curvas IDF, corresponden a las bandas de los pluviógrafos con los registros de las precipitaciones diarias y horarias.

Paso 3: Determinación de intensidades máximas

En esta etapa se analizan las bandas de registro de los pluviógrafos, para lo cual se realizan diversos muestreos. Se parte con mediciones desde las 08:00 h de la mañana de un día hasta las 08:00 h. del día siguiente, para una duración de 24 horas; luego, es necesario desplazarse en intervalos de tiempo de forma discreta y estable, utilizando para ello cuñas, con el propósito de ir seleccionando para cada año los valores extremos de precipitación para tiempos de 1, 2, 4, 6, 8, 12 y 24 horas. Posteriormente, se toman los valores de cada una de las series y se dividen por su duración D en (horas), obteniéndose así las intensidades en mm/h.

Es importante mencionar, que la estación a estudiar debe poseer bandas pluviográficas con la información anual completa, y en lo posible para una serie mayor a 15 años. Ver cuadro 3.

Cuadro 3. Alturas máximas de precipitación (mm) asociadas a 1 hora

Año	Duraciones (h)						
	1	2	4	6	8	12	24
año ₁	h_{11}	h_{21}	h_{41}	h_{61}	h_{81}	h_{121}	h_{241}
año ₂	h_{12}	h_{22}	h_{42}	h_{62}	h_{82}	h_{122}	h_{242}
año ₃	h_{13}	h_{23}	h_{43}	h_{63}	h_{83}	h_{123}	h_{243}
año _n	h_{1n}	h_{2n}	h_{4n}	h_{6n}	h_{8n}	h_{12n}	h_{24n}

A continuación, se muestra en el ejemplo 1, las alturas máximas de precipitación asociadas a una hora.

Ejemplo 1. Alturas máximas de precipitación (mm) asociadas a 1 hora (Estación Talca, Chile)

Año	Duraciones (h)						
	1	2	4	6	8	12	24
1982	8,1	14,2	23,8	35,3	37,2	43,8	59,7
1983	8,2	8,7	13,7	15,0	19,3	19,7	19,7
1984	13,1	21,4	30,8	39,2	52,0	69,8	91,8
1985	5,9	7,7	11,1	13,3	16,2	16,9	16,9
1986	9,4	13,7	26,6	32,9	42,0	45,5	69,4
1987	14,3	25,7	40,6	49,1	51,3	50,5	64,2
1988	10,0	14,7	29,0	30,7	29,0	40,7	40,7
1989	10,2	16,6	28,1	25,6	23,5	35,0	49,3
1990	10,8	20,8	34,2	39,5	44,3	42,3	57,1
1991	9,2	14,7	20,8	23,7	25,6	37,6	45,0
1992	10,2	13,4	21,6	25,3	30,4	28,2	47,6
1993	9,5	12,8	15,0	18,3	22,3	26,8	27,8
1994	6,1	7,8	11,4	13,3	13,3	13,3	14,8
1995	6,1	9,9	13,8	18,0	19,4	18,7	19,4
1996	7,8	9,0	15,1	14,8	19,5	21,2	31,1
1997	8,2	12,2	19,4	24,3	20,3	29,0	35,6
1998	8,5	15,0	20,9	25,4	26,3	26,3	30,5

En función de la metodología planteada por Témez, cada altura máxima de precipitación horaria se divide por su duración en horas, obteniéndose las intensidades de precipitación máximas anuales en mm/h y para cada duración. En el cuadro 4, se muestran los valores de intensidad de precipitación para la estación pluviográfica.

Cuadro 4. Intensidades máximas horarias anuales de precipitación (mm/h)

Año	Duraciones (h)						
	1	2	4	6	8	12	24
año ₁	I ₁₁	I ₂₁	I ₄₁	I ₆₁	I ₈₁	I ₁₂₁	I ₂₄₁
año ₂	I ₁₂	I ₂₂	I ₄₂	I ₆₂	I ₈₂	I ₁₂₂	I ₂₄₂
año ₃	I ₁₃	I ₂₃	I ₄₃	I ₆₃	I ₈₃	I ₁₂₃	I ₂₄₃
año _n	I _{1n}	I _{2n}	I _{4n}	I _{6n}	I _{8n}	I _{12n}	I _{24n}
Media	$\bar{X}_1 \dots \dots \dots \bar{X}_n$						
Desviación estándar	$S_1 \dots \dots \dots S_n$						

Ejemplo 2. Intensidades máximas horarias anuales de precipitación (mm/h).
(Estación Talca, Chile)

Año	Duraciones (h)						
	1	2	4	6	8	12	24
1982	8,10	7,10	5,95	5,88	4,65	3,65	2,49
1983	8,20	4,35	3,43	2,50	2,41	1,64	0,82
1984	13,10	10,70	7,70	6,53	6,50	5,82	3,83
1985	5,90	3,85	2,78	2,22	2,02	1,41	0,70
1986	9,40	6,85	6,65	5,48	5,25	3,79	2,89
1987	14,30	12,85	10,15	8,18	6,41	4,21	2,68
1988	10,00	7,35	7,25	5,12	3,63	3,39	1,69
1989	10,20	8,30	7,03	4,27	2,94	2,92	2,05
1990	10,80	10,4	8,55	6,58	5,54	3,53	2,38
1991	9,20	7,35	5,20	3,95	3,20	3,13	1,88
1992	10,20	6,70	5,40	4,22	3,80	2,35	1,98
1993	9,50	6,40	3,75	3,05	2,79	2,23	1,16
1994	6,10	3,90	2,85	2,22	1,66	1,11	0,62
1995	6,10	4,95	3,45	3,00	2,43	1,56	0,81
1996	7,80	4,50	3,78	2,47	2,44	1,77	1,30
1997	8,20	6,10	4,85	4,05	2,54	2,42	1,48
1998	8,50	7,50	5,23	4,23	3,29	2,19	1,27
Media	9,15	7,01	5,53	4,35	3,62	2,77	1,77
Desviación estándar	2,27	2,50	2,13	1,74	1,52	1,21	0,88

Paso 4: Ajuste de los datos a la función de distribución de probabilidad de Gumbel

El siguiente paso metodológico, corresponde al ajuste de los valores de intensidad de precipitación a la función de distribución de probabilidad de Gumbel, obteniéndose los parámetros (μ, d) de la función, para cada duración (Pizarro y Novoa, 1986).

La función de Gumbel, utilizada ampliamente en los estudios hidrológicos e hidráulicos, ha demostrado poseer una adecuada capacidad de ajuste a valores máximos de precipitación, para series de datos con una longitud adecuada. Gumbel está definido por la siguiente distribución de probabilidad (3):

$$F(X) = P[\varepsilon \leq X] = e^{-e^{-d(x-\mu)}} \quad \text{con } -\infty \leq x \leq \infty \quad (3)$$

Donde;

x : Valor a asumir por la variable aleatoria.

d, μ : Parámetros de la función.

e : Base de los logaritmos neperianos.

Despejando x de (3), queda;

$$x = \mu - \frac{\ln(-\ln F(X))}{d} \quad (4)$$

Para la determinación de los parámetros d y μ , se utilizan las siguientes expresiones que los definen:

$$\mu = \bar{x} - 0,450047 \cdot S \quad (5)$$

$$\frac{1}{d} = 0,779696 \cdot S \quad (6)$$

donde:

\bar{x} : Media aritmética de la serie de datos considerados.

S : Desviación típica de la muestra de datos considerados.

Los valores 0,450047 y 0,779696, son válidos para un número de cincuenta datos. Sin embargo, Heras (s/a), los señala como admisibles para cualquier tamaño de población, en virtud de la escasa relevancia que poseen. Luego, es posible determinar la función de Gumbel, con la información entregada precedentemente. Ver ejemplo 3.

Ejemplo 3. Estimación de los parámetros de la función de Gumbel por hora (Estación Talca, Chile)

Duración (h)	μ	d
1	8,132	0,566
2	5,884	0,513
4	4,572	0,604
6	3,566	0,736
8	2,934	0,846
12	2,225	1,057
24	1,368	1,448

Paso 5: Determinación de las pruebas de bondad de ajuste

La bondad de ajuste es la asimilación de datos observados de una variable, a una función matemática previamente establecida y reconocida. A través de ésta es posible interpolar y extrapolar información; en otras palabras, predecir el comportamiento de la variable en estudio (Pizarro y Novoa, 1986).

Una vez ajustada la función de Gumbel, se deben llevar a cabo las pruebas de bondad de ajuste, utilizándose como medidas de bondad el test de Kolmogorov-Smirnov y el Coeficiente de Determinación R^2 , para cada duración (Shao, 1970; Cid *et al*, 1990).

Para la aplicación del test de Kolmogorov-Smirnov, es necesario determinar la frecuencia observada acumulada. Para ello, se ordena la información de menor a mayor y se aplica:

$$F_{n(x)} = \frac{n}{N + 1} \quad (7)$$

donde:

$F_n(x)$: Frecuencia observada acumulada.

n : Número de orden.

N : Número total de datos.

En el caso de la frecuencia teórica acumulada, ésta se determina a través de la función de Gumbel.

$$F(x) = e^{-e^{-d(x-u)}} \quad (8)$$

Una vez determinadas ambas frecuencias, se obtiene el supremo de las diferencias entre ambas, en la i -ésima posición de orden, que se denomina D.

$$D = \text{Sup} | F_n(x)_i - F(x)_i | \quad (9)$$

Luego, asumiendo un valor de significancia, se recurre a la tabla de valores críticos de D en la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov (anexo II), y considerando el tamaño de la muestra, se establece lo siguiente:

Si $D < D_{\text{tabla}}$, se acepta que el ajuste es adecuado, con el nivel de confiabilidad asumido.

Los parámetros de la función para cada duración se presentan en el ejemplo 4.

Ejemplo 4. Determinación del nivel de ajuste del test Kolmogorov - Smirnov para cada duración. (Estación Talca, Chile)

Estación Talca $D_t = 0,318$		
Duración (h)	D_c	Ajuste
1	0,124	A
2	0,091	A
4	0,135	A
6	0,111	A
8	0,091	A
12	0,081	A
24	0,112	A

Donde:

A : Es aceptado el modelo.

D_c : Estadístico de Kolmogorov-Smirnov calculado.

D_t : Estadístico de Kolmogorov-Smirnov tabulado.

Por otra parte, el Coeficiente de Determinación indica qué proporción de la variación total de las frecuencias observadas, es explicada por las frecuencias teóricas acumuladas y viene determinado por la siguiente expresión:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (F_n(x))_i - F(x)_i)^2}{\sum (F_n(x)_i - \overline{F_n(x)})^2} \quad (10)$$

donde:

R^2 : Coeficiente de determinación $0 \leq R^2 \leq 1$.

$\overline{F_n(x)_i}$: Media de las frecuencias observadas acumuladas.

Ejemplo 5. Coeficiente de Determinación (R^2), para cada duración (Estación Talca, Chile)

Duración (h)	R^2
1	0,957
2	0,956
4	0,953
6	0,951
8	0,955
12	0,970
24	0,969

Paso 6: Determinación de las tablas de uso práctico

En esta etapa se procede a la construcción de tablas, tomándose para esto la relación de cada duración con la de 24 horas y para los distintos periodo de retorno. Ello, porque la precipitación de 24 horas es la más común de encontrar y estas relaciones permitirían la extrapolación a zonas sin datos.

Así, se muestra el ejemplo 6, que permite visualizar las intensidades para distintos períodos de retorno (T).

Ejemplo 6. Intensidades de precipitación para distintos periodos de retorno (Estación Talca, Chile)

Duración (h)	Periodos de retorno (T) en años								
	T5	T10	T20	T30	T40	T 50	T60	T75	T100
1	10,78	12,11	13,38	14,12	14,63	15,03	15,36	15,75	16,27
2	8,81	10,27	11,67	12,48	13,05	13,49	13,85	14,28	14,85
4	7,06	8,30	9,49	10,18	10,66	11,04	11,34	11,71	12,19
6	5,60	6,62	7,60	8,16	8,56	8,87	9,12	9,42	9,81
8	4,71	5,60	6,45	6,94	7,28	7,55	7,77	8,03	8,37
12	3,64	4,35	5,04	5,43	5,70	5,92	6,09	6,30	6,58
24	2,40	2,92	3,42	3,70	3,91	4,06	4,19	4,34	4,54

A la relación de las intensidades horarias con respecto a la intensidad de 24 h, se le denomina parámetro k, el cual es calculado para cada duración y periodo de retorno. Dicho parámetro queda establecido en la siguiente expresión (11):

$$k = \frac{I d}{I_{24}} \quad (11)$$

Donde:

I_d : Intensidad de precipitación horaria.

I_{24} : Intensidad de precipitación para una duración de 24 horas.

Ejemplo 7. Parámetro k para distintos periodos de retorno y duraciones

Duración (h)	Parámetro k para los distintos periodos de retorno (T) en años								
	T5	T10	T20	T30	T40	T50	T60	T75	T100
1	4,49	4,15	3,91	3,82	3,74	3,70	3,67	3,63	3,58
2	3,67	3,52	3,41	3,37	3,34	3,32	3,30	3,29	3,27
4	2,94	2,84	2,78	2,75	2,73	2,72	2,71	2,70	2,69
6	2,33	2,27	2,22	2,21	2,19	2,18	2,18	2,17	2,16
8	1,96	1,92	1,88	1,87	1,86	1,86	1,85	1,85	1,84
12	1,52	1,49	1,47	1,47	1,46	1,46	1,45	1,45	1,45
24	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS CURVAS IDF

Otra forma de desarrollar las curvas IDF es a través de una forma analítica propuesta por Aparicio (1997). Dicho autor plantea la alternativa de obtener una ecuación que genere las curvas IDF a través de un modelo de regresión lineal, de modo de extrapolar la ecuación generada, a zonas que carezcan de registros pluviográficos y que se encuentren relativamente cerca. Para ello, se procede a analizar el comportamiento de las variables involucradas en este estudio, relacionando simultáneamente las tres variables en una familia de curvas, para lo cual se utiliza la ecuación (12) propuesta por Chen (1983), la que ha sufrido una pequeña modificación, a saber:

$$I = \frac{kT^m}{D^n} \quad (12)$$

Donde k, m y n son constantes de regresión lineal múltiple, T es el período de retorno en años, D la duración en minutos u horas, e I la intensidad de precipitación en mm/h.

Luego, aplicando los logaritmos a la ecuación (12) es posible obtener un modelo de regresión lineal múltiple, el cual puede ser aplicado directamente en zonas cercanas y homogéneas al área de estudio, en un modelo que queda de la siguiente forma:

$$\log I = \log k + m \log T - n \log D \quad (13)$$

$$y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2$$

Donde:

$$\begin{array}{ll} y = \log I & a_o = \log k \\ X_1 = \log T & a_1 = m \\ X_2 = \log D & a_2 = -n \end{array}$$

La calidad de la regresión, se verifica al analizar los supuestos de regresión para la función modelada, es decir, se debe cumplir con los supuestos de Normalidad, Homocedasticidad y no-Autocorrelación (Gujarati, 1992).

LA VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN

Conceptualmente, la velocidad de infiltración determina la cantidad de agua que se infiltra a través de un medio poroso no saturado, por una unidad de tiempo. Existen diversos métodos para la determinación de la velocidad de infiltración del agua en el suelo, entre los cuales están:

- Cilindros infiltrómetros (fotografía 1).
- Surcos infiltrómetros.
- Método de represa o poceta.

Independiente de la utilidad práctica de cada uno de ellos, el método con infiltrómetro ha sido el más recurrentemente utilizado, ya que requiere de menos equipos y materiales, y son más fáciles de instalar y operar.



Fotografía 1. Cilindro infiltrómetro

El método del cilindro

Este método se ha utilizado generalmente para determinar la velocidad de infiltración en suelos agrícolas y forestales, y en particular, en los que se establecerán métodos de riego, tales como acequias en contorno, bordes, tazas, aspersión y goteo.

Según Gurovich (1985), los materiales necesarios para la ejecución adecuada de éste, son:

- a. Cilindro metálico de acero, de un diámetro no inferior a 30 cm y de 0,5 cm de grosor.
- b. Martillo (pesado para labores de penetración en el suelo).
- c. Estanque de agua de 10 a 15 litros.
- d. Agua de igual calidad.
- e. Regla milimétrica.

- f. Protector de erosión (plástico, madera en el fondo del cilindro).
- g. Cronómetro o reloj.



Fotografía 2. Método del cilindro (en terreno)

El registro de las mediciones, se realiza cronometrando y registrando en una tabla la infiltración del agua en el suelo, a partir de las distintas alturas de agua en el cilindro. Se recomienda utilizar los siguientes intervalos periódicos de tiempo: 5, 10, 20, 30, 45, 60, 90..... minutos. Ver cuadro 5.

Cuadro 5. Determinación de la velocidad de infiltración de los suelos

Tiempo (t) (min)	Altura (cm)	Altura (cm)	Diferencial de altura (D_h) (cm)	Infiltración (V_i) (mm/h)
0	18		0	
5	16		2,0	240
10	15,2		0,8	96
20	13,4		1,8	108
30	12,5		0,9	54
45	10,8	18*	1,7	68
60		16,1	1,9	76
90		12,5	3,6	72
Promedio de infiltración				65 mm/h

* Llenado del cilindro (18 cm)

Para el cálculo de la velocidad de infiltración (14) se emplea la siguiente expresión matemática, a saber:

$$V_i = \frac{D_h \cdot 600}{t} \quad (14)$$

Donde:

- V_i : Velocidad de infiltración en mm/h.
 D_h : Diferencial de altura de agua (cm).
 t : Diferencial de tiempo (m).

De esta forma, es posible representar gráficamente la relación entre la infiltración de agua en el suelo y el tiempo (gráfico 3).

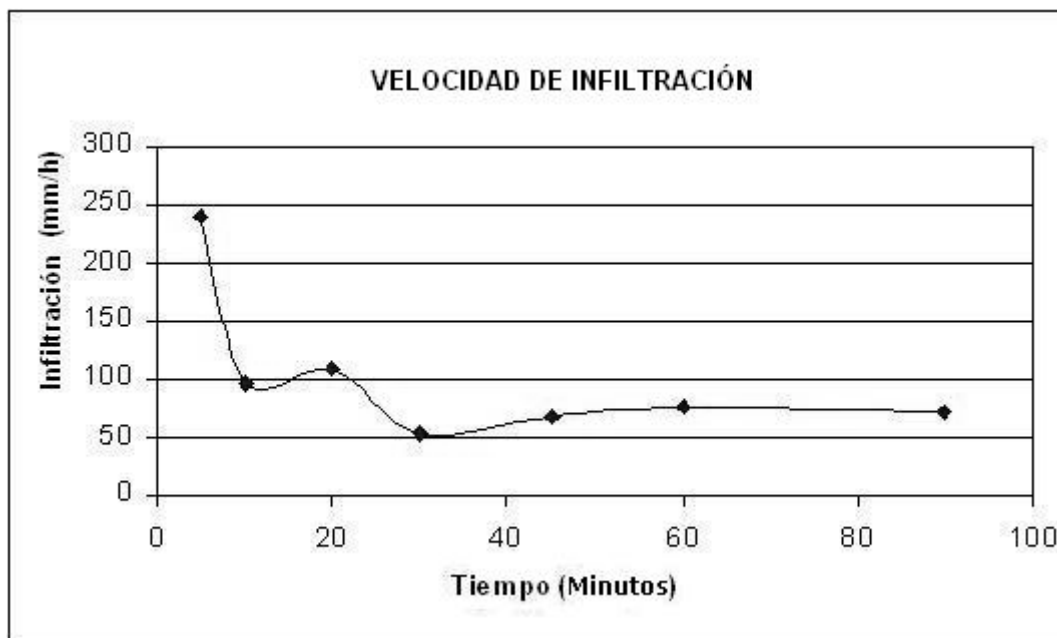


Gráfico 3. Curva de Infiltración (método del cilindro)

Con el fin de asumir un criterio conservador en el diseño, que asegure que las obras no colapsen, se debe optar por el criterio de utilizar el promedio de los tres valores de menor velocidad de infiltración. Luego, del cuadro 5, el valor de infiltración promedio es 65 mm/h.

En este marco, la tasa de infiltración de un suelo depende, principalmente, de su textura. Las cifras comparativas típicas de infiltración son las siguientes. Ver cuadro 6.

Cuadro 6. Tasas de infiltración para diferentes texturas de suelos

Textura del suelo	Tasa de Infiltración (mm/h)
Arenosa	50
Franco - Arenosa	25
Franca	12
Franco - Arcillosa	7

Fuente: Critchley y Siebert, 1996.

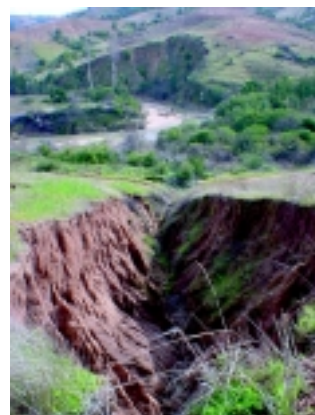
EL COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA

Finalmente el último concepto a saber es el coeficiente de escorrentía (e), el cual se define como la parte de la precipitación que se presenta en forma de flujo de agua en el suelo. Su dimensión varía entre 0 y 1, y está inversamente correlacionado con la capacidad de infiltración, es decir, son superficies impermeables las que tienen el más alto coeficiente de escorrentía.

Es recomendable utilizar valores altos de coeficientes de escorrentía, con el fin de generar mayores condiciones de seguridad, y así se garantice, que la obra no será sobrepasada por las aguas lluvias. Ver capítulo 3.

Capítulo 2: Las zanjas de infiltración

Como resultado de las malas prácticas antrópicas en suelos de aptitud agrícola y/o forestal, se ha provocado una progresiva disminución de la productividad de los terrenos, especialmente en sectores del secano interior y costero, donde las condiciones de aprovechamiento hídrico no son favorables para el establecimiento y desarrollo normal de los cultivos.



Fotografía 3. Erosión de cárcava en el sector de Manzanares, VIII Región



Fotografía 4. Erosión de cárcava en el sector de Cavilolén, IV Región

Ante esta situación, la aprobación y vigencia de la Ley 19.561 de fomento forestal trajo consigo un aumento sustancial, pero aún insuficiente, de la incorporación de las técnicas de recuperación de suelos y aprovechamiento de las aguas lluvias en muchos sectores degradados ambientalmente de Chile, lo que ha permitido frenar esta tendencia negativa.

En este sentido, una de las prácticas más comunes son las zanjas de infiltración. Su popularidad radica en la fácil laboriosidad, posee bajos costos de construcción, requiere de una rápida capacitación a los obreros, responde a una economía de escala, es una obra bonificada por el Estado y se obtienen buenos resultados silvícolas (prendimiento, crecimiento y desarrollo).

Asimismo, se ha constituido en los últimos años, como una opción tecnológica válida para el pequeño propietario, en términos de la oportunidad de negocio y la invisible protección de los recursos naturales, que permitirá establecer actuaciones valoradas en una nueva función de sustentabilidad económica, social y ambiental.

¿Qué son las zanjas de infiltración?

Las zanjas de infiltración son canales sin desnivel construidos en laderas, los cuales tienen por objetivo captar el agua que escurre, evitando procesos erosivos de manto, permitiendo la infiltración del agua en el suelo.

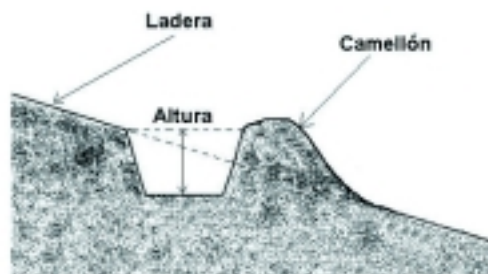


Figura 1. Vista transversal de una zanja en la ladera

Según la Corporación Nacional Forestal (CONAF), esta obra de recuperación de suelos, comprende un conjunto de zanjas, construido de forma manual o mecanizada, que se sitúan en la parte superior o media de una ladera, para capturar y almacenar la escorrentía proveniente de las cotas superiores (según diseño 2003).

La zanja de infiltración se construye transversalmente a la pendiente, en la curva de nivel. Presenta una sección trapezoidal, con un ancho en la base de 0,2 a 0,3 metros, una altura de 0,2 a 0,55 metros, una pendiente lateral del talud aguas abajo de 1:z, donde $z = 0,5$ a $0,7$ y una pendiente lateral del talud aguas arriba de 1:z, donde $z = 0,8$ a 1 .

El distanciamiento a través de la pendiente entre las zanjas se calcula de acuerdo a la precipitación de diseño, estableciéndose un promedio referencial en la horizontal de 7,5 metros, lo que puede variar según la inclinación del terreno. El largo fluctúa entre 3 a 6 metros y la separación o tabique entre zanjas en la curva de nivel, varía entre 0,7 y 1,5 metros, según la altura de ellas.

Aguas abajo de la obra, se deberá construir un camellón de similar altura que la zanja y con un ancho equivalente a la anchura superior de la obra.

Cabe señalar que, el diseño de las zanjas de infiltración atiende fundamentalmente a los siguientes criterios:

- i. El espaciamiento entre zanjas debe ser tal que permita un control adecuado de la erosión.
- ii. La capacidad adecuada de las zanjas debe almacenar un determinado volumen de agua producido por la lluvia y favorecer el crecimiento de las plantas.

Adicionalmente, es posible incorporar algún tipo de cultivo en los espacios intermedios entre zanjas, con el propósito de aumentar la productividad del sitio.

Las características técnicas de las zanjas de infiltración son función de las condiciones de suelo y clima de la zona donde se pretenden implementar.

Efectos positivos de las zanjas de infiltración

- Aumento de la capacidad de infiltración de agua en el suelo.
- Disminución de la escorrentía del agua.
- Disminución de los procesos erosivos.

Por otro lado, es importante enfatizar que la mantención de la zanja es imprescindible para aumentar su vida útil; esta mantención se refiere a la limpieza del material arrastrado por el agua (fotografía 5).



Fotografía 5. Actividades de mantención de las obras

La aplicación de las técnicas de conservación de aguas y suelos, en las plantaciones de *Pinus radiata* (D.Don), aumenta la eficiencia en la captura y retención de humedad (ver gráfico 4), lo que conlleva a obtener crecimientos más rápidos y sostenidos en lugares en los cuales, no se esperarían estos resultados positivos (Pizarro *et al*, 2001).

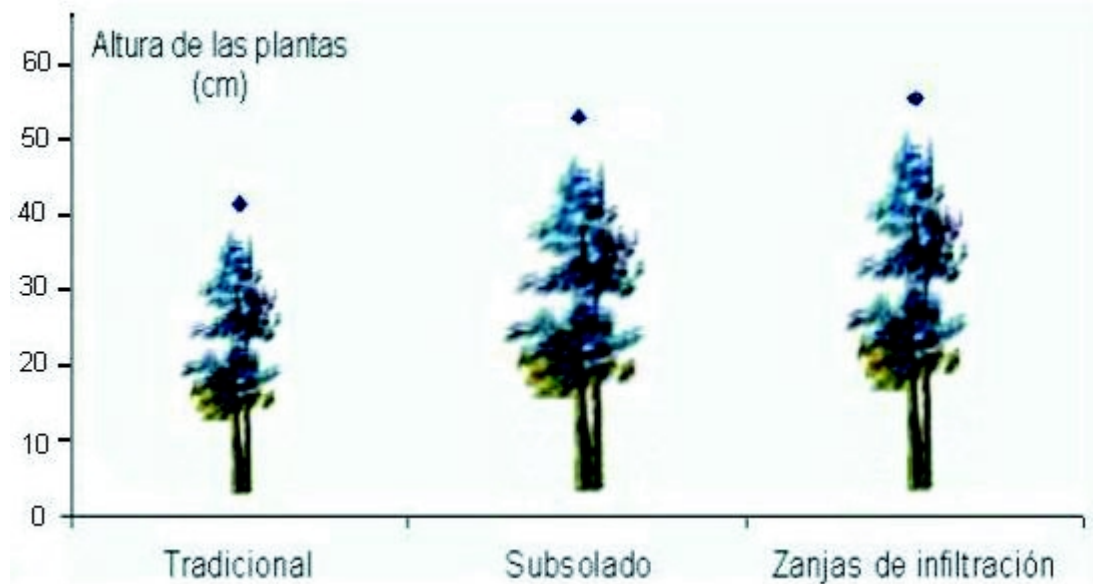


Gráfico 4. Comparación de crecimiento con distintas técnicas de conservación de aguas y suelos en un año en *Pinus radiata* (D.Don) (Microcuenca del Estero Barroso, VII Región). Pizarro y Saavedra, 1999

Según Pizarro *et al* (2003), el principio fundamental a la hora de diseñar las zanjias de infiltración, corresponde a que la cantidad de agua de lluvia que cae en la zona de captación, debe ser menor o igual a la que capta y absorbe la zanja. Es decir, la capacidad de ésta no debe ser sobrepasada por el total de aportaciones que a ella converjan.

Así:

$$V_e = V_o + V_i \quad (15)$$

Donde

V_e : Volumen de escorrentía aportada por la zona de impluvio.

V_o : Volumen de captación de la obra.

V_i : Volumen de infiltración.

En este marco, se deben realizar los siguientes análisis:

- Definir el periodo de retorno (años).
- Determinar la intensidad máxima de precipitación en 1 hora (mm/h).
- Determinar de la velocidad de infiltración (mm/h).

- Definir el coeficiente de escorrentía (adimensional).
- Definir la configuración geométrica de las zanjas.

Una vez definidos todos los elementos de diseño, la incógnita a dilucidar es ¿A qué distancia se construye una zanja de otra?

Distanciamiento entre zanjas de infiltración

Se recomienda que las características geométricas de las zanjas de infiltración a construir, posean un perfil de 30 cm de altura x 20 cm de base, mientras que éstas tienen un largo «l» variable. El diseño considera un rebaje en el borde aguas arriba para facilitar la entrada de agua y evitar la erosión de las paredes; así, el diseño queda como sigue:

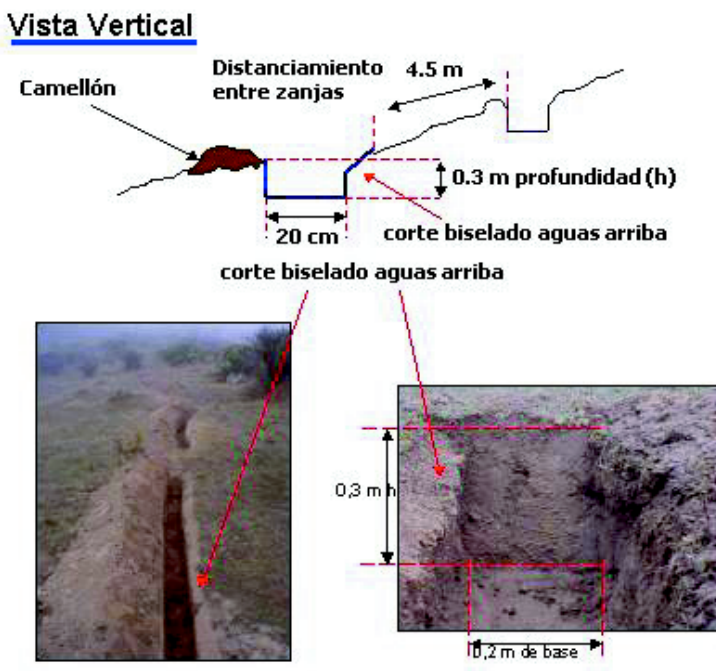


Figura 2. Perfil de una zanja de infiltración

$$V_{azi} = V_{azz} + V_{azin} \quad (16)$$

Donde:

V_{azi} : Volumen de aportación zona de impluvio.

V_{azz} : Volumen de captación zona de zanjas.

V_{azin} : Volumen de infiltración.

En primer lugar, V_{azi} corresponde al volumen de aportación de la zona de impluvio en m^3 ; la expresión que define cada una de las variables es la siguiente:

$$V_{azi} = I \cdot S \cdot e \quad (17)$$

Donde:

I : Intensidad de precipitación (máxima 1 hora) para el diseño de una obra (mm/h).

S : Superficie de captación.

e : Coeficiente de escorrentía

Un segundo elemento de la ecuación N° 16, es determinar el volumen de captación de las zanjas de infiltración (V_{azz}), expresado en m^3 , que matemáticamente, por su configuración geométrica, se estructura de la siguiente forma:

$$V_{azz} = b \cdot h \cdot L \quad (18)$$

Donde:

b : Base de la zanja en metros.

h : Altura de la zanja en metros.

L : Largo de la zanja en metros.

Finalmente, un tercer elemento a considerar, es el volumen de infiltración de agua (m^3), quedando definido por la base y el largo de la zanja, y la velocidad de infiltración del agua en el suelo.

Este último componente variará principalmente según la textura del suelo, la materia orgánica existente, la pendiente y la vegetación presente en el terreno, por lo que se recomienda medir la infiltración de forma uniforme y representativa de la unidad territorial de conservación y aprovechamiento de las aguas lluvias.

$$V_{azin} = b \cdot v \cdot L \quad (19)$$

Donde:

V_{azin} : Volumen de infiltración.

b : Base de la zanja en metros.

v : Velocidad de infiltración de la zanja en m/h.

L : Largo de la zanja en metros.

Asociado a lo expuesto en la ecuación (16), se plantea lo siguiente:

$$\begin{aligned} V_{azi} &= V_{azz} + V_{azin} \\ I \cdot S \cdot e &= (b \cdot h \cdot L) + (b \cdot v \cdot L) \\ I \cdot [L \cdot d] \cdot e &= (b \cdot h \cdot L) + (b \cdot v \cdot L) \\ d &= \frac{b \cdot (h + v)}{I \cdot e} \end{aligned} \quad (20)$$

Cabe señalar, que este distanciamiento es horizontal, por lo que debe ser corregido en función de la pendiente. Además, este valor puede ser ajustado, en caso de valores con decimales, para darle una aplicabilidad técnica en terreno.

Construcción de la zanja de infiltración

Paso 1: Identificar línea a nivel



Las líneas de zanjas deben quedar construidas en una línea sin pendiente. Para esto se puede utilizar el nivel de ingeniero, o ser reemplazado con un nivel en A (fotografía 6) con una plomada en el vértice superior y/o un nivel de agua en la base. Así también, es posible incorporar la técnica de nivel de las mangueras con agua, que es muy práctica y utilizada en el campo chileno.

Fotografía 6. Instrumento: Nivel en A

En este contexto, la mayoría de los operadores forestales que trabajan en el área de la recuperación de suelos degradados, utilizan el nivel en A, por su rápida nivelación en terreno.

Paso 2: Medición y marcación de las zanjas

Se deben marcar las zanjas en el suelo de acuerdo a las dimensiones establecidas. Se recomienda construir una zanja de 5 metros de largo, con un taco o separación de 0,5 a 1 metro entre zanjas (figura 3) y una separación entre líneas de construcción, que indique el diseño elaborado por el profesional competente, para las condiciones edafoclimáticas del sector.

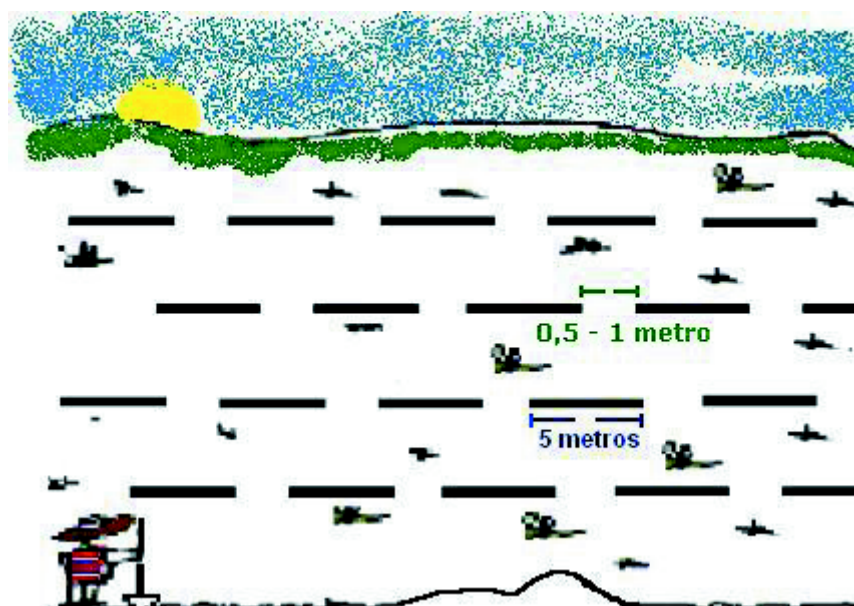


Figura 3. Disposición de las zanjas en el terreno

Paso 3: Construcción de las zanjas

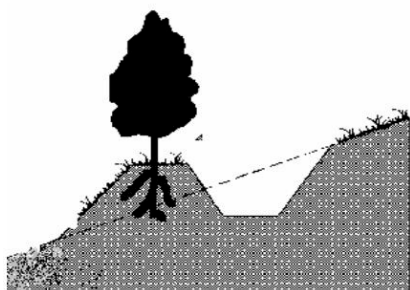
Una vez marcadas las zanjas en el suelo, se sigue con la construcción. Ésta se realiza con herramientas tradicionales, es decir pala, picota y chuzo.



Fotografía 7. Faenas de construcción de zanjas de infiltración

La tierra que se saca de la zanja se deposita en la parte baja de la misma, para formar un camellón, el cual debe ser ligeramente compactado.

Paso 4. Plantación



Para lograr resultados más favorables, es necesario acompañar las obras con una plantación, la cual se puede realizar sobre el camellón formado por la tierra sacada de la zanja (figura 4), o en la zona entre zanjas de infiltración.

Figura 4. Bosquejo de la plantación sobre el camellón



Fotografía 8. Plantación de *Pinus radiata* (D.Don) en sectores con zanjas de infiltración

Paso 5: Mantenimiento

Finalmente, la zanja debe ser mantenida periódicamente, es decir debe ser limpiada y reparada.

Costos y rendimientos de una zanja de infiltración

Uno de los principales obstáculos en la construcción de una obra de conservación y aprovechamiento de aguas y suelos, es la decisión de «innovar» por parte de los pequeños propietarios agrícolas y/o forestales. La incorporación de nuevas técnicas y metodologías del trabajo de la tierra imponen y demandan nuevos desafíos, que no siempre se está dispuesto a enfrentar. Sumado a esto, el costo y la capacitación de los obreros en la construcción de las obras, hace necesario el apoyo a través de un instrumento estatal de subsidio o bonificación.

Por otra parte, una investigación y recopilación (Pizarro *et al*, 2004) de las experiencias realizadas a nivel nacional (entre la IV y VIII regiones), por la Sociedad de Estándares de Ingeniería para Aguas y Suelos Ltda., recopiló datos de 17 experiencias de construcción de zanjas de infiltración (mayoritariamente ejecutadas por (CONAF), con información de costos y rendimientos, a partir de los reportes e informes entregados por dicha Corporación y otras instituciones. Asimismo, sólo fue posible considerar los sectores con estudios completamente caracterizados (en términos de costos, rendimientos, tipo de obra, configuración y diseño), lo que restringió altamente las unidades muestreadas y la incorporación de mayor número de sectores a analizar. A pesar de ello, cabe mencionar que, el número de experiencias con obras de conservación de suelos, se ha incrementado explosivamente a partir del año 2002, conforme a la vigencia de la ley 19.561, por lo que, futuros muestreos podrán determinar y discriminar si los estándares constructivos actuales han ido modificándose y/o ajustándose.

Cabe señalar que existía una alta variabilidad en las dimensiones geométricas de las zanjas de infiltración, lo que provocó un trabajo adicional en la homogeneización de las unidades de costos, en términos de transformar el costo por metro lineal a metro cúbico.

Los costos de construcción de zanjas, analizados en base al volumen de tierra removido en metros cúbicos (m^3), alcanza un valor promedio de **3.883 \$/m³** (Pizarro *et al*, 2004). Este monto dista bastante del costo establecido por la tabla de costos de CONAF, del año 2003, con un costo mínimo estandarizado de **29.125 \$/m³**, considerando una dimensión de zanjas con base: 0,2 metros; ancho: 0,2 metros; altura: 0,2 metros. Asimismo, se verificó que los valores más bajos de construcción corresponden a trabajos realizados con programas de absorción de mano de obra mientras que, los valores de menor costos y rendimientos altos, se encontraron en sectores productivos de propiedad privada (Santa Sofía - Forestal Celco S.A.- VIII Región).

En cuanto al rendimiento en metros cúbicos por jornada, los valores registran un promedio de 3,3 m^3/j , con un mínimo que se encuentra en la experiencia realizada en Sierras de Bellavista, VI Región (0,9 m^3/j), y un máximo que se registró en Santa Sofía, VIII Región (5,9 m^3/j). Así, el rendimiento en los sectores de Cerro Pajaritos, Cuesta Cavilolén y La Muñozana de la Cuarta Región, parece ser más regular (2,8 m^3/j); en cambio, en otras regiones los rendimientos son disímiles entre cada sector, resultando ser más sensibles, al parecer, a la capacitación de

los trabajadores en este tipo de obra, las condiciones de terreno, condiciones contractuales, etc. En promedio, la VIII región posee el mayor rendimiento de construcción con 5,1 m³/j.

En este marco, es posible detectar que existe una alta variabilidad en los costos y rendimientos de construcción de las obras de conservación de aguas y suelos, por lo que se debe suponer que los valores promedios son una referencia descriptiva de las diferentes situaciones y condiciones de cada sector.

Las zanjas de infiltración y el Proyecto EIAS

En el marco de las actividades del Proyecto EIAS, ejecutado por la Sociedad de Estándares de Ingeniería de Aguas y Suelos Ltda., se evaluaron 5 ensayos demostrativos con zanjas de infiltración, asociados a una plantación de *Pinus radiata* (D.Don). Estos ensayos están emplazados en el secano costero e interior de las regiones VI, VII y norte de la VIII de Chile Central.

A continuación, se caracteriza cada uno de los sectores seleccionados para el establecimiento de las unidades de investigación. Lo importante de esto, es referenciar las características geográficas, edáficas, vegetacionales y topográficas, de modo de relacionar y contrastar dicha información con los resultados del diseño hidrológico de las zanjas de infiltración.

En primer lugar, los cuadros 7, 8 y 9, muestran las características de los sitios experimentales seleccionados en las regiones VI, VII y norte de la VIII, respectivamente.

Cuadro 7. Características de los sitios experimentales seleccionados en la VI Región

SECTOR/ENSAYO	CARACTERÍSTICAS
Hijuela 2 al Llope (Pumanque)	Corresponde a un lomaje suave con un relieve más o menos regular, su pendiente media es 15% con una exposición Oeste, su uso anterior era pastoreo extensivo. Su cubierta es de especies herbáceas, sin presencia de arbustos. PROPIETARIO: María Acevedo Ortíz
Paso Ancho (Hidango)	El predio es de uso agropecuario. Su cubierta es de especies herbáceas y algunos ejemplares de zarzamora. El relieve corresponde a un lomaje suave y bastante regular; su pendiente media corresponde al 16% con una exposición Noroeste. PROPIETARIO: Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA

Cuadro 8. Características de los sitios experimentales seleccionados en la VII Región

SECTOR/ENSAYO	CARACTERÍSTICAS
Hijuela N° 2 Las Mercedes (Name)	Este predio corresponde a una pradera con cubierta herbácea y algunos arbustos, principalmente espino. El uso anterior del predio fue pastoreo. Su pendiente media es de 13% con exposición Norte. PROPIETARIO: Orlando González Salazar
Predio Botacura (Botacura)	Este predio pertenece a Bosques de Chile S.A. y el lugar de ensayo presentaba una plantación de Pino Insigne adulto que fue cosechado durante el año 2001. El ensayo se encuentra dividido en dos módulos cercanos entre sí, y ambos al lado del camino interior del predio, en la parte media baja de un cerro; uno con exposición Oeste (subsulado y zanjas) y el otro más pequeño con exposición Norte (zanjas). PROPIETARIO: Bosques de Chile S.A.
Predio Parrón (Parrón)	Este predio pertenece a Bosques de Chile S.A. y al igual que el anterior fue explotado durante el año 2001. El ensayo se encuentra al lado del camino interior del predio, en la parte media alta de un cerro, con una exposición Noreste y una pendiente media de 20%. PROPIETARIO: Bosques de Chile S.A.

Cuadro 9. Características de los sitios experimentales seleccionados en la VIII Región

SECTOR/ENSAYO	CARACTERÍSTICAS
Predio Llohué (Llohué)	Este predio fue explotado durante el año 2001, de una plantación de pino insignie adulto. El ensayo se encuentra al lado del camino interior del predio, en la parte alta de un cerro, con una pendiente media del 22% y exposición Noroeste. PROPIETARIO: Terranova S.A.
Fundo Manzanares (Manzanares)	Este predio históricamente ha sido usado para la siembra de trigo, correspondiendo a un lomaje suave con exposición noroeste y pendiente media de 20%. Está dividido en tres módulos y se estudiará el diseño de zanjas de infiltración y subsulado. PROPIETARIO: Bosques Villanueva Ltda.

En segundo lugar, el cuadro 10 muestra un análisis textural para cada ensayo experimental del proyecto EIAS. Así, se puede visualizar la presencia de texturas muy particulares; por un lado, los franco arenosos, los que se conocen corrientemente como suelos livianos, a pesar que por unidad de volumen son más pesados. Asimismo, se observa la presencia de los suelos Franco Arcillosos y Arcillosos, los cuales se conocen como suelos pesados, aunque su densidad aparente es menor, y donde la labranza de la tierra es más difícil.

Cuadro 10. Características físicas presentes en los ensayos

Nombre del ensayo	Textura	Densidad aparente	Capacidad de campo	Punto de marchitez permanente
Llohué	Franco arcilloso	1,36	25,20	12,10
Manzanares	Franco arcilloso	1,38	26,00	12,40
Name	Franco arcilloso arenoso	1,27	29,92	19,68
Parrón	Arcilloso	1,44	16,66	9,02
Botacura	Franco arenoso	1,46	15,06	8,90
Pumanque	Franco arcillo arenoso	1,42	17,60	9,85
Hidango	Franco arcillo arenoso	1,39	18,70	11,51

Fuente: Laboratorio de Suelos, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Talca.

Asociado a esto, la densidad aparente depende, en gran medida, de la textura del suelo. De acuerdo a esto, Donoso (1994) plantea que la densidad de las partículas en la mayor parte de los suelos minerales que no poseen materia orgánica, varía entre 1,30 y 1,35, usándose normalmente como promedio 1,325.

Finalmente, el cuadro 11, muestra las características químicas de los suelos, así, las cantidades nutricionales, específicamente en NPK (compuesto fertilizante a base de Nitrógeno, Fósforo y Potasio), plantearon la necesidad de fertilizar en todos los ensayos involucrados en el proyecto, debido a que el NPK es un componente de múltiples sustancias, en las cuales las deficiencias de este nutriente, significan interferencias directas en el crecimiento y desarrollo de las plantas de *Pinus radiata* (D.Don).

Cuadro 11. Componentes nutricionales presentes en los ensayos por regiones

ENSAYO	N PPM	P PPM	K PPM	M.O. %	PH	C.E. DS/M	CA CMOL/KG	MG CMOL/KG	K CMOL/KG	NA CMOL/KG	B PPM
Llohué	10	3	22	0,4	5,60	—	2,08	2,02	0,06	0,21	0,14
Manzanares	4	3	40	0,28	7,33	0,033	7,91	2,94	0,10	0,11	0,16
Name	3	5	16	0,69	6,56	0,023	3,38	1,65	0,86	0,09	0,28
Parrón	3	4	335	4,13	5,56	0,071	4,02	2,95	0,17	0,04	0,91
Botacura	3	13	67	1,37	6,31	0,027	3,83	1,16	0,20	0,02	0,32
Pumanque	1	5	5	1,42	5,86	0,023	1,60	0,85	0,14	0,07	0,65
Hidango	4	6	236	2,14	6,13	0,063	11,05	3,55	0,60	0,11	0,30

Fuente: Laboratorio de Suelos, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Talca.

En este contexto, el diseño experimental llevado a cabo para las zanjas de infiltración estableció, en cada situación, 2 modalidades, así, se diferenciaron en el ancho de éstas, es decir 20 y 30 cm, denominándose zanjas tipo 1 y zanjas tipo 2, respectivamente

A partir del diseño hidrológico se pueden apreciar, en el cuadro 12, los distanciamientos óptimos obtenidos para los dos tipos de zanjas propuestos en esta investigación, considerando las intensidades de precipitación máximas horaria y la velocidad de infiltración, de cada uno de los ensayos.

Cuadro 12. Distanciamiento óptimo entre líneas de zanjas, según diseño hidrológico

Ensayo	Distanciamiento entre líneas de zanjas en metros		Intensidad máxima horaria (mm/h)	Velocidad de Infiltración (mm/h)
	Zanjas Tipo 1 (0,2 m)	Zanjas Tipo 2 (0,3 m)		
Hidango-INIA	4	6	15,78	89,3
Pumanque	4,5	6,5	18,90	38,0
Name	4	6	17,61	20,3
Parrón	9	13	15,78	356,0
Botacura	8	11	15,10	300,0
Llohué	9	13	19,00	451,3
Manzanares	4,5	6,5	19,00	72,0

Cabe hacer notar, que el espaciamiento entre las líneas de zanjas de infiltración disminuye a medida que la longitud de la base de las zanjas se reduce, y por ende, se reduce la capacidad volumétrica de las obras y viceversa.

Una vez determinados los requerimientos técnicos de las zanjas de infiltración, basados en un diseño hidrológico, fueron realizadas validaciones del diseño en cada uno de los lugares donde se implementarían tales obras de conservación y aprovechamiento de aguas y suelos, con el fin de contrastar el diseño teórico, con la realidad en terreno. En este sentido, las mayores variaciones entre ambas situaciones, fueron dadas por las curvas de nivel, las que modificaron los diseños originales, en lo que respecta a la disposición espacial de las líneas de zanjas, y con respecto a la línea de cerco y el largo de las zanjas en algunos casos.

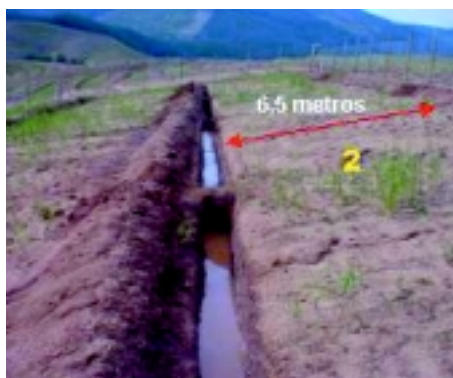
Para complementar la información entregada en los cuadros anteriores, las fotografías 9, 10 y 11, muestran una vista panorámica de los espaciamientos entre zanjas de infiltración, para distintas intensidades de precipitación de diseño.



Fotografía 9. Diseño ensayo Pumanque, VI Región
(Intensidad máxima de precipitación = 18,8 mm/h)



Fotografía 10. Diseño ensayo Name, VII Región
(Intensidad máxima de precipitación = 17,9 mm/h)



Fotografía 11. Diseño ensayo Manzanares, VIII Región
(Intensidad máxima de precipitación = 19,0 mm/h)

Los mejores rendimientos de construcción, se vieron cuando el operador forestal capacitó, al inicio de cada actividad, a sus obreros para las siguientes actividades de construcción.

- Marcación previa de las líneas de construcción con estacas.
- Marcación previa de las zanjas de infiltración, preferentemente con estacas y cáñamo, o bien, con un molde de construcción.
- Nivelación en terreno con un nivel en A, que constaba de un nivel de agua y una plomada.
- Construcción de las zanjas de infiltración.
- Formación del camellón con la tierra removida de la zanja.
- Biselado de las zanjas.
- Control e inspección inmediata de las dimensiones y nivelación de la base de la zanja.

Las faenas del sector de Name (VII Región de Chile), por ejemplo, alcanzaron los 31 metros lineales por jornal, en unas zanjas de base de 30 cm, un terreno arcilloso y con una pendiente media del 15%, mientras que, el rendimiento alcanzado con una base menor (base = 20 cm) fue de 47 metros lineales; estos valores están dentro de los raros promedios que puede alcanzar un operador forestal. Ahora bien, existe un rango de variabilidad entre los rendimientos de los dos tipos de zanjas que abarca desde los 5 metrolineal/jornal (Llohué) y los 31 metrolineal/jornal (Hidango). Así, se visualizó en terreno, que en sectores de praderas estables con un suelo arable, fue posible encontrar rendimientos mayores, y la variabilidad en el rendimiento constructivo aumenta, mientras que, en sectores de reforestación (posterior a la tala del bosque) con presencia de tocones, y con una alta pedregosidad, los rendimientos son menores, y se pudo visualizar que no existe una diferencia significativa con los rendimientos de construcción, entre los dos tipos de zanjas (de 20 cm o 30 cm). Ver cuadro 13.

Cuadro 13. Rendimiento de las obras de construcción de zanjas de infiltración

Ensayo	Metros totales construidos de zanjas	Rendimiento (ml/jornal) en zanjas		Diferencial (metrolineal/jornal)
		base: 20 cm, altura:30 cm	base: 30 cm, altura:30 cm	
Pumanque	547	70	47	23
Hidango	620	91	60	31
Parrón	328	33	22	11
Botacura	328	22	15	7
Name	620	47	31	16
Manzanares	553	19	12,6	6,4
Llohué	328	14,9	9,9	5

El diseño y la construcción de una obra de conservación de aguas y suelos, deben siempre relacionarse en función de conceptos de seguridad constructiva, por ello, considérese los escenarios más desfavorables y conservadores, según lo disponga el presupuesto de los trabajos de conservación. En términos hidrológicos, la construcción de zanjas de infiltración debe incorporar variables, tales como, el período de retorno, las máximas intensidades de precipitación en una hora para series de datos pluviográficos completas de 20 años y los valores mínimos de velocidad de infiltración de agua en el suelo, lo que debe permitir que las obras intercepten el agua lluvia de forma adecuada y no sean sobrepasadas de agua.

En este marco, el año 2002, fue una excelente prueba de validación, desde el punto de vista hidrológico, dado que se registraron numerosos eventos con altas intensidades de precipitación (Bravo, 2002), respondiendo de buena forma, cada una de las obras en los 7 sectores del seco costero e interior de Chile central, habilitados con zanjas de infiltración y que fueron diseñados con base hidrológica.

Considérese que para los meses de octubre del año 2002 a octubre de 2003, los 6 pluviógrafos instalados en cada uno de los ensayos, registraron valores de intensidades de precipitación (cuadro 14) menores a los utilizados en el diseño y construcción de las obras, con excepción, al registrado en el mes de mayo del 2003, en el ensayo de Hidango el año 2003, pero que está muy cercano a la proporcionada por las curvas IDF de la zona de Litueche VI Región (15,78 mm/h), lo que no provocó daños en la configuración de las zanjas, ni el deterioro del camellón.

Cuadro 14. Intensidades máximas de precipitación (mm/h), en cada zona de estudio

Máx 1 hr	2002						2003						
	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
Hidango	9,4	1,6	1,4	0,4	0,2	0,2	0,2	16,2	15,0	14,4	0	7,2	3,6
Pumanque	2,2	0,2	1,0	3,0	?	?	?	?	4,2	14,4	4,8	4,4	2,2
Name	13,6	3,0	3,6	3,4	0,6	0,2	1,2	8,8	10,0	10,6	3,6	4,2	4,4
Parrón	14,2	4,0	5,0	2,2	0	0,2	5,4	11	14,0	7,8	0,4	-	-
Botacura	6,8	0,4	?	?	?	?	?	0,2	9,8	0	7,8	6,6	1,7
Manzanares	5,4	4,0	1,2	3,4	0	0,2	1,2	8,8	7,0	6,4	0	5,0	3,8
Llohúe	5,4	4,0	1,2	3,4	0	0,2	1,2	8,8	7,0	6,4	0	5,0	3,8

Finalmente, se muestra la captura y el aprovechamiento de las aguas lluvias en las zanjas de infiltración, como un elemento demostrativo y dimensionador del proceso hidrológico (fotografías 12, 13 y 14).



Fotografía 12. Funcionamiento de las zanjas de infiltración después de la caída de lluvias en Pumanque, VI Región



Fotografía 13. Funcionamiento de las zanjas de infiltración después de la caída de lluvias en Name, VII Región



Fotografía 14. Funcionamiento de las zanjas de infiltración después de la caída de lluvias en Manzanares, VIII Región

Capítulo 3: Los canales de desviación de aguas lluvias

A lo largo del país, y particularmente en vastas zonas de Chile Central, las comunidades rurales se vinculan a la subsistencia predial, basada en las intensas aguas lluvias invernales, y la pronunciada escasez estival, por lo que sus economías están íntimamente relacionadas con el manejo y la regulación del recurso hídrico, y donde la actuación de profesionales, instituciones y organismos públicos, adquiere una ineludible relevancia, en términos de alcanzar un desarrollo productivo acorde con una adecuada sustentabilidad económica, social y ambiental.



(a)



(b)

Fotografía 15. Zonas semiáridas de Chile Central



Fotografía 16. Erosión de cárcava en Paredones, VI Región.

Adicionalmente, la topografía abrupta y la escasa cobertura vegetal en gran parte de las zonas semiáridas de Chile Central favorecen la escorrentía, que es la responsable de la mayoría de los fenómenos erosivos en predios agrícolas y/o forestales.



Figura 17. Vista transversal del ensayo: Control de cárcava (Paredones, VI Región)

Por esta razón, es necesario diseñar y calcular las obras de ingeniería de captura, aprovechamiento y evacuación de aguas lluvias, a nivel de ladera o cauce. Por ello, se enfrenta un esquema de trabajo que exige una optimización fina de las posibilidades de evacuación sin daño.

En este capítulo, se presentan los principales elementos y parámetros técnicos para la evacuación de aguas, como una opción tecnológica para sectores con grandes problemas de erosión. Así, se dan los criterios y bases para la selección, diseño, cálculo y trazado de canales de desviación, para conducción de agua.

¿Qué son los canales de desviación de aguas lluvias?

Este tipo de canales tiene como objetivo interceptar, desviar y conducir el agua de la escorrentía proveniente de las laderas altas, hacia drenajes de almacenamiento de agua o hacia cursos permanentes de agua.

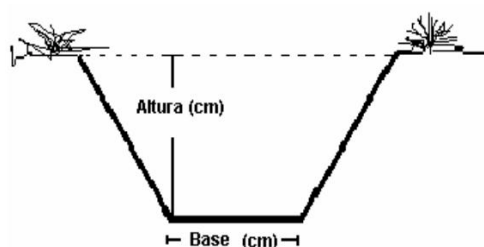


Figura 5. Canal de desviación de aguas lluvias (forma trapezoidal)

La forma que tiene este tipo de canal, puede ser muy variada, pero se recomienda, la trapezoidal (figura 5).

Es importante destacar, que este tipo de obras es de gran utilidad para detener la erosión que produce el agua sobre aquellos suelos sin vegetación, cuando existen pendientes fuertes, y cuando ya existe erosión producida por la lluvia.

Según la Corporación Nacional Forestal (CONAF), el canal de desviación es una obra de recuperación de suelos, manual o mecanizada, que se sitúa preferentemente en la parte superior o media de la ladera para capturar la escorrentía procedente de las cotas superiores. Se construye (Según diseño 2003) transversalmente a la pendiente con un ligero desnivel (1%) para transportar el agua a una salida estabilizada. Presenta una sección con un ancho mínimo en la base de 0,2 metros y una altura efectiva mínima de 0,2 metros. Las dimensiones deben permitir evacuar un volumen de agua según la precipitación de diseño. Aguas abajo, adyacente a la excavación, se construye un camellón de altura y ancho similares a la profundidad del canal y a la anchura superior de la obra, respectivamente. El largo máximo es de 100 metros. Las aguas del canal siempre deben evacuar en un área receptora estabilizada.

El diseño de un canal

¿Una sección trapezoidal?. Sí, ofrece las mejores perspectivas de construcción, en términos de diseño, replanteo y aspectos de costos, especialmente si el canal es construido en tierra.

Es posible diseñar un canal trapecial mediante dos metodologías; la primera, dice relación con un método que contempla caudal y velocidad de diseño conocida; en tanto la segunda, utiliza como elemento base de diseño la ecuación de Manning, para estimación de caudales. Sin embargo, ambas presentan como denominador común ciertas consideraciones de diseño, referidas al valor que debe adoptar el radio hidráulico.

Se define el radio hidráulico, como el cociente entre el área de la sección (A) y el perímetro mojado (Pm).

$$R = \frac{A}{Pm} \quad (21)$$

Para la construcción de un canal con los mínimos requerimientos de materiales y una sección optimizada, se debe contemplar la maximización del valor del radio hidráulico, es decir,

$$R = \frac{h}{2} \quad (22)$$

donde,

R : Radio hidráulico.

h : Tirante o altura efectiva del canal.

Las consideraciones matemáticas sobre este punto, se presentan en el anexo III de este documento, en tanto la figura 6, representa la sección transversal del canal.

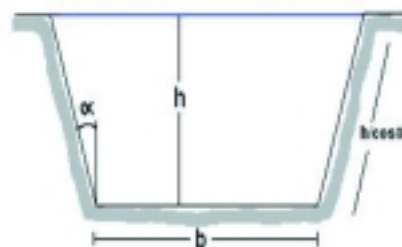


Figura 6. Sección transversal de un canal trapecial

Ahora bien, el diseño de un canal de desviación no sólo debe contemplar el análisis hidrológico e hidráulico de la configuración geométrica y el trazado topográfico de la obra, sino también requiere del conocimiento de las condiciones de relieve, edáficas, y composición vegetal del sector, para lo cual se hace necesario realizar visitas de terreno y establecer un emplazamiento preliminar del canal.

En este marco, el presente diseño y construcción del canal de desviación de aguas lluvias, está basado en el análisis metodológico de la ecuación de Manning y la ecuación racional, lo que se resume a través de los siguientes pasos:

Paso 1: Determinación del caudal

Un elemento primordial antes de comenzar un proyecto de estas características, es la definición de la forma de la sección transversal del canal. Como ya se sabe, estas obras involucran un alto costo de construcción, para lo cual, se recomienda una configuración trapecial, que permite optimizar el diseño y los recursos financieros del usuario.

Utilizando la ecuación racional para la determinación del caudal, se tiene:

$$Q = C \cdot I \cdot A_i \quad (23)$$

Donde,

Q : Caudal en m³/s.

C : Coeficiente de escorrentía.

I : Intensidad de precipitación máxima (se recomienda usar una intensidad máxima en 30 minutos).

A : Área de impluvio en ha.

El primer parámetro es el coeficiente de escorrentía, definido como la parte de la precipitación que se presenta en forma de flujo de agua en el suelo, y según Chow *et al* (1994), es la variable menos precisa del método racional. Asimismo, su uso en la fórmula implica una relación fija entre la tasa de escorrentía pico y la tasa de lluvia para la cuenca de drenaje, lo cual no es cierto en la realidad. Una selección apropiada del coeficiente de escorrentía requiere del conocimiento y la experiencia por parte del hidrólogo. Este coeficiente depende del porcentaje de permeabilidad, de la pendiente y de las características de encharcamiento de la superficie. De este modo, superficies impermeables, tales como los pavimentos de asfalto o los techos de edificios, producirán una escorrentía de casi el ciento por ciento después de que la superficie haya sido completamente mojada.

Así también, el coeficiente de escorrentía depende de las características y las condiciones del suelo. La tasa de infiltración disminuye a medida que la lluvia continúa y también es influida por las condiciones de humedad antecedentes en el suelo. Otros factores que influyen en el coeficiente de escorrentía son la intensidad de la lluvia, la proximidad del nivel freático, el grado de compactación del suelo, la porosidad del subsuelo, la vegetación, la pendiente del suelo y el almacenamiento por depresión.

Se recomienda visitar el área donde será construida la obra, y apoyarse de fotografías aéreas, para obtener una mayor precisión en la estimación y/o la ponderación de las distintas cubiertas presentes en el área de impluvio.

En el cuadro 15, se detallan cada uno de estos factores para distintos tipos de superficies.

Cuadro15. Coeficiente de escorrentía para ser usado en el método racional ($Q = C I A_i$)

Zonas desarrolladas							
Asfáltico	0,73	0,77	0,81	0,86	0,90	0,95	1,00
Concreto/techo	0,75	0,80	0,83	0,88	0,92	0,97	1,00
Zonas verdes (jardines, parques, etc.)							
Condición pobre (cubierta de pasto menor del 50% del área)							
Plano 0 - 2%	0,32	0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,58
Promedio 2 - 7%	0,37	0,40	0,43	0,46	0,49	0,53	0,61
Pendiente superior a 7%	0,40	0,43	0,45	0,49	0,52	0,55	0,62
Condición promedio (cubierta de pasto menor del 50% del área)							
Plano 0 - 2%	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41	0,53
Promedio 2 - 7%	0,33	0,36	0,38	0,42	0,45	0,49	0,58
Pendiente superior a 7%	0,37	0,40	0,42	0,46	0,49	0,53	0,60
Condición buena (cubierta de pasto menor del 50% del área)							
Plano 0 - 2%	0,21	0,23	0,25	0,29	0,32	0,36	0,49
Promedio 2 - 7%	0,29	0,32	0,35	0,39	0,42	0,46	0,56
Pendiente superior a 7%	0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,51	0,58
Zonas desarrolladas							
Áreas de cultivos							
Plano 0 - 2%	0,31	0,34	0,36	0,40	0,43	0,47	0,57
Promedio 2 - 7%	0,35	0,38	0,41	0,44	0,48	0,51	0,60
Pendiente superior a 7%	0,39	0,42	0,44	0,48	0,51	0,54	0,61
Pastizales							
Plano 0 - 2%	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41	0,53
Promedio 2 - 7%	0,33	0,36	0,38	0,42	0,45	0,49	0,58
Pendiente superior a 7%	0,37	0,40	0,42	0,46	0,49	0,53	0,60
Bosques							
Plano 0 - 2%	0,22	0,25	0,28	0,31	0,35	0,39	0,48
Promedio 2 - 7%	0,31	0,34	0,36	0,40	0,43	0,47	0,56
Pendiente superior a 7%	0,35	0,39	0,41	0,45	0,48	0,52	0,58

Nota: Los valores de este cuadro son los estándares utilizados en la ciudad de Austin, Texas. (Chow *et al*, 1994)

Un segundo elemento, es la determinación de la intensidad de precipitación máxima para un lapso de 30 minutos. De otra forma, se puede asociar a la intensidad de lluvia, un tiempo de concentración (T_c) de las aguas (ver capítulo 4).

Ya sabemos también, que los mayores registros de intensidades de lluvia ocurren en lapsos muy cortos, particularmente, en zonas áridas y semiáridas. En este sentido, existe una mayor probabilidad de registrar eventos de altas intensidades de precipitación, por lo que se debe considerar una mayor *intensidad de diseño* de la obra, la cual debe ser acorde a las condiciones más desfavorables. Por consiguiente, al aumentar la seguridad del diseño de una obra, influirá directamente en el incremento de los costos de construcción.

Uno de los requerimientos fundamentales en el cálculo de la intensidad de diseño es poseer una buena información de las intensidades máximas de cada lluvia. Para ello se necesita la información de una estación pluviográfica. Ver anexo IV - a.

En el marco del proyecto EIAS, el ensayo experimental de Llanillos (VII Región), contempla el diseño y la construcción de un canal de desviación de aguas lluvias, basado en la obtención y manejo de información de tipo hidrológica, para lo cual se utilizó la estación pluviográfica de Penciahue (muy cercana al ensayo), que presenta registros de intensidades de precipitación bastante completos y cuenta con las curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia). Por ello, la curva utilizada viene dada por la siguiente fórmula:

$$I = \frac{63,694 \cdot T^{0,164143}}{D^{0,469797}} \quad (24)$$

Donde,

I : Intensidad de precipitación para el diseño de obras (mm/h).

T : Periodo de retorno en años.

D : Duración de la lluvia en minutos.

Sin embargo, cerca del ensayo de Paredones, en la VI Región, donde también se construyó un canal de desviación, no existe ninguna estación que posea las curvas IDF, siendo la más cercana la estación de Penciahue. (Pizarro *et al*, 2001), por lo que fue posible extrapolar información donde sólo existe una estación pluviométrica cercana (anexo IV - b), mediante el uso de parámetros K obtenidos de la estación pluviográfica de referencia más cercana. Así, se pudo relacionar la expresión matemática número 11, del capítulo 1.

El último elemento a considerar en la ecuación racional (23), es la superficie de captación de aguas lluvias, la cual aporta directamente el agua a la obra en estudio. Es decir, es la superficie que proporcionará el agua que será evacuada por la obra. Ver figura 7.



Figura 7. Área de impluvio (A)

Dependiendo de la proporcionalidad de la superficie sobre la obra, deberá escogerse un buen método de medición que permita estimar un valor con un bajo error porcentual de la medición. Para conseguir este objetivo, puede apoyarse en la utilización de instrumentos topográficos y/o georreferenciales.

Finalmente, y teniendo los valores de todos los parámetros, se calcula el caudal de diseño, a través de la ecuación racional (23), para lo cual se recomienda expresar el gasto o caudal en m^3/s .

Paso 2: Cálculo de la sección del canal

Si se considera que, en términos generales, el caudal se define como el producto de la sección del canal, y la velocidad del agua, se aprecia que el elemento restante para validar la definición de la sección, lo constituye la velocidad del agua. Así,

$$Q_{\text{caudal}} = A \cdot V \quad (25)$$

donde,

A : Sección del canal (m^2).

Q : Caudal en m^3/s .

V : Velocidad en m/s .

Despejando A, se tiene:

$$A = \frac{Q}{V} \quad (26)$$

Ahora bien, la velocidad del agua involucrada, es aquella que sea máxima en función del tipo de superficie que posea el canal, de tal manera que no sea erosiva. Dicha velocidad máxima, puede ser determinada en la tabla de Agres y Scoates (1939), citada por Pizarro, 1988.

Cuadro 16. Velocidades máximas permitidas en canales (Agres y Scoates, 1939, aumentada con valores de Foster, 1967).

Material	Velocidad (m/s)
Suelo arenoso muy suelto	0.30 - 0.45
Arena gruesa o suelo arenoso suelto	0.46 - 0.60
Suelo arenoso promedio	0.61 - 0.75
Suelo franco arenoso	0.76 - 0.83
Suelo franco de aluvión o ceniza volcánica	0.84 - 0.90
Césped de crecimiento ralo o débil	0.90
Suelo franco pesado o franco arcilloso	0.90 - 1.20
Suelo con vegetación regular	1.22
Suelo arcilloso o cascajoso	1.20 - 1.50
Césped vigoroso, denso y permanente	1.52 - 1.83
Conglomerados, cascajo cementado, pizarra blanda	1.80 - 2.40
Roca dura	3.00 - 4.50
Hormigón	4.51 - 6.00

Paso 3: Cálculo de parámetros hidráulicos

Cálculo del tirante (h)

Para calcular el tirante o altura efectiva del canal, se necesita, previamente, determinar el ángulo de inclinación del talud del canal con respecto a la vertical, dado que la formulación matemática obtenida a través de la maximización del radio hidráulico, así lo requiere.

Luego, h se define como:

$$h = \sqrt{\frac{A \cos \alpha}{2 - \sin \alpha}} \quad (27)$$

donde,

A : Sección del canal en m^2 .

α : Ángulo del talud con respecto a la vertical. Se recomienda usar un ángulo de 30° .

Por otra parte, el ángulo α se limita en canales de tierra, en virtud del proceso erosivo que puedan sufrir los márgenes del canal. En ese contexto, la elección del ángulo debe ser cuidadosa y en función de la experiencia, se puede recomendar que α no sea menor a 20° , en términos muy generales. De igual forma, si el canal se encuentra adecuadamente revestido, α puede asumir cualquier valor.

Cálculo de la base de fondo (b)

La base del canal está determinada por la expresión:

$$b = \frac{A}{h} h \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (28)$$

Cálculo de la longitud de talud (L)

La longitud de talud (L) se define como,

$$L = \frac{h}{\cos \alpha} \quad (29)$$

por consiguiente el perímetro mojado es, $P = b + 2L$

En este contexto, y en función de la expresión que consigue maximizar el radio hidráulico, es posible obtener relaciones entre α , b y L.

Así se puede dar lo siguiente, en términos de ejemplo orientador a la elección del ángulo (Pizarro, 1988):

$$\text{Si } \alpha = 36,37^\circ \Rightarrow b = L / 2$$

$$\text{Si } \alpha = 30,00^\circ \Rightarrow b = L$$

$$\text{Si } \alpha = 21,47^\circ \Rightarrow b = 2 L$$

$$\text{Si } \alpha = 16,31^\circ \Rightarrow b = 3 L$$

$$\text{Si } \alpha = 13,00^\circ \Rightarrow b = 4 L$$

Cálculo de la pendiente del canal (s)

Si se aplica la ecuación de Manning, se tiene que,

$$Q = \frac{1}{n} s^{1/2} \cdot R^{2/3} \cdot A \quad (30)$$

Donde;

Q : Caudal a conducir, en m^3/s .

n : Coeficiente de rozamiento de Manning (anexo V).

s : Pendiente longitudinal del canal, en m/m.

R : Radio hidráulico, en metros; ($R = \frac{h}{2}$).

A : Sección transversal en m^2 .

Cálculo de la revancha (r)

Con el objetivo de evitar derrames por turbulencia y oleaje del agua, se hace

necesario estructurar un margen de seguridad; por ello se adiciona a la longitud del talud, el valor "r", o revancha, que se define empíricamente como la expresión (31), o bien a través del empirismo que el constructor posea para este tipo de obras.

$$r = \frac{1}{3} \cdot h \quad (31)$$

Construcción de un canal de evacuación de aguas lluvias

Paso 1:

Se debe comenzar analizando la situación que se presenta en el terreno, para identificar si se hace necesario su realización. Entonces, se debe observar si se presentan algunas de las siguientes situaciones que se muestran en la figura 8.

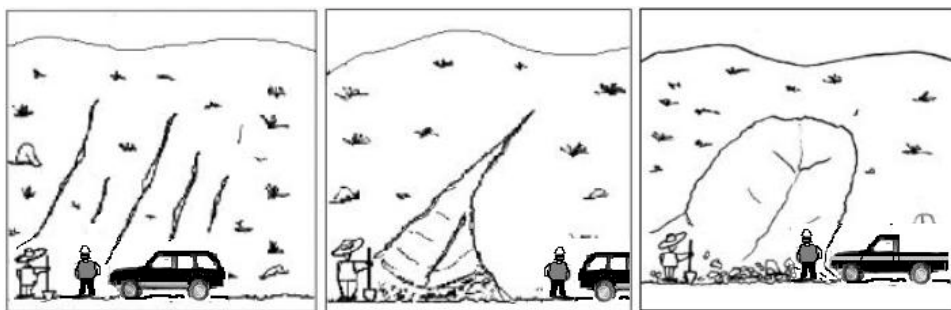


Figura 8. Situaciones en que es necesaria la construcción de un canal de desviación de aguas lluvias

Paso 2:

Si en el terreno se presentan algunas de estas condiciones, entonces se puede decidir construir un canal como el que se muestra en la figura 9.

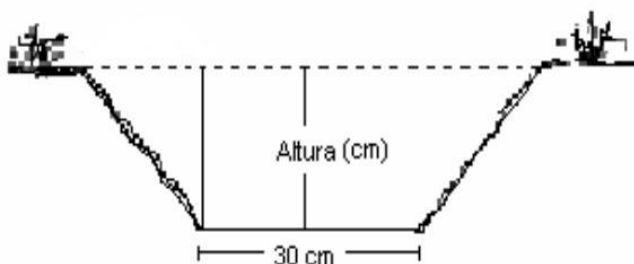


Figura 9. Sección transversal de un canal

Para comenzar por la construcción del canal, se debe determinar su diseño de acuerdo a la metodología ya planteada. Generalmente, se construyen estas obras con una base de 30 cm, pero debe ser el análisis hidráulico y edáfico el que determine las dimensiones del canal.

Para evitar la entrada de agua a una cárcava que presente grave peligro de erosión, el canal debe localizarse a una distancia prudencial de la cabeza o extremo superior de ella, de manera que quede construido sobre terreno firme. Para eso,

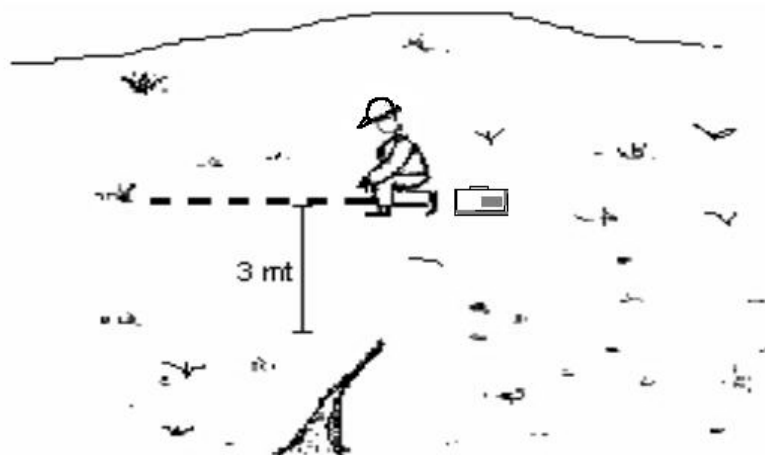


Figura 10. Distanciamiento entre el canal y el inicio de una cárcava

se debe considerar que el canal se traza sobre la cárcava a una distancia mínima de 3 metros, desde donde ésta comienza (Ver figura 10).

Desde ahora ya se puede comenzar con la construcción del canal, en base a los distintos parámetros hidráulicos calculados. Asimismo, se recomienda complementar esta obra con un camellón, con la tierra extraída del canal (figura 11).

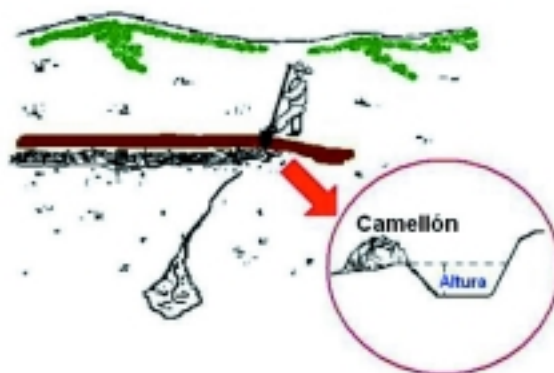


Figura 11. Camellón de tierra

Paso 3:

Los requerimientos básicos utilizados para el trazado y construcción de un canal son:

- Herramientas: Pala, picota y chuzo.
- Estacas graduadas.
- Nivel de ingeniero.
- Obreros capacitados.
- Jefe o coordinador de la obra.

Para facilitar la configuración de la sección transversal del canal en terreno, se confecciona un molde constructor con las dimensiones especificadas en el diseño elaborado en gabinete (fotografía 18).



Fotografía 18. Molde de construcción de canales

Paso 4:

El principio fundamental en la construcción de las obras de conservación de aguas y suelos es «evacuar sin daño», es decir, que el tramo final del canal deberá cumplir ciertas exigencias, tales como:

- 1° disminuir de forma progresiva, pero suavemente la pendiente del canal.
- 2° reforzar las paredes con sacos de arena u otro revestimiento de protección.
- 3° verificar que la zona de evacuación esté en condiciones de recepcionar adecuadamente tal carga de agua, sin provocar erosión del suelo.
4. nunca evacuar en una cárcava, o en sitios con problemas de erosión.

Así también, se hace necesario saber la extensión o largo del canal, que dependerá del lugar de emplazamiento, cumpliendo y verificando que la zona de evacuación no sea dañada por el caudal proveniente del canal.

Paso 5:

Al finalizar la construcción del canal, éste podrá tener una vida útil acorde al horizonte de planificación establecido por el usuario, periodo durante el cual se deben realizar tareas como la limpieza de desechos acumulados dentro del canal y el arranque de malezas desde dentro del canal (figura 12).

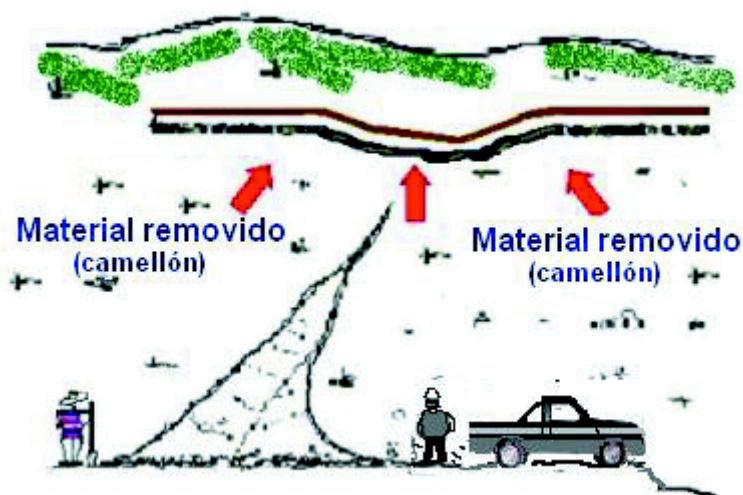


Figura 12. Faenas de limpieza del canal

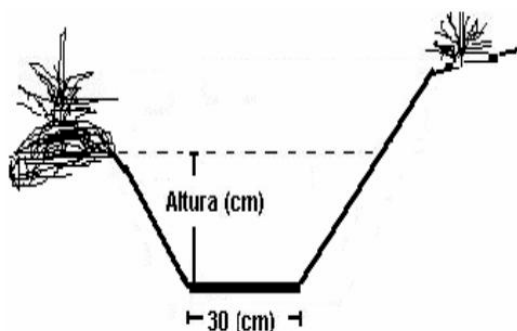
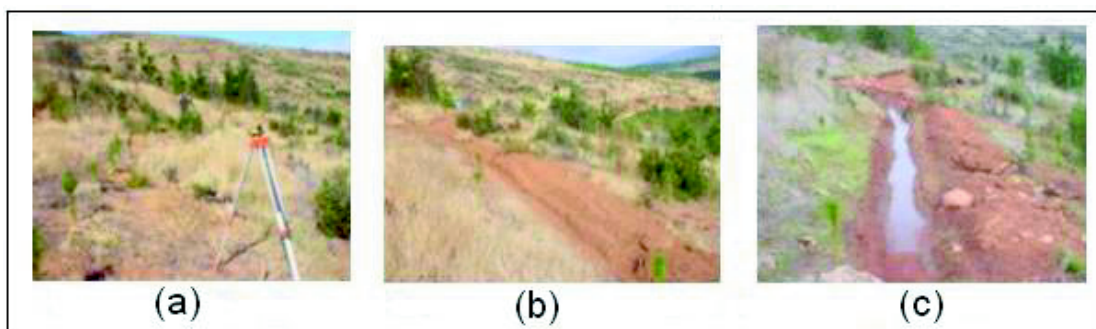


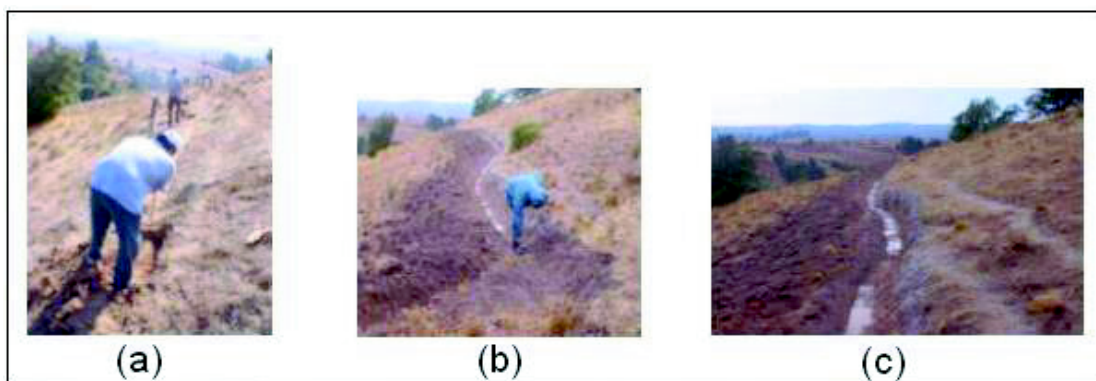
Figura 13. Estabilización de un canal con plantas herbáceas

Importante: Se pueden efectuar algunas tareas para mejorar la duración y la calidad del canal. Para esto se pueden realizar plantaciones de plantas herbáceas (malezas) en el camellón de tierra (figura 13). Esto sirve para darle mayor estabilidad y soporte al canal.

Las fotografías 19 y 20, muestran algunas etapas del trazado y construcción de dos canales de desviación de aguas lluvias emplazados en los sectores de Paredones (VI Región) y Llanillos (VII Región), correspondientes a los ensayos de medición y control de cárcavas.



Fotografía 19. Módulo experimental de Paredones (VI Región)
 (a) Equipo: Nivel de Ingeniero (b) Trazado del canal de desviación (c) Verificación del diseño: evacuar sin daño



Fotografía 20. Módulo experimental de Llanillos (VII Región)
 (a) Etapa de construcción (b) Verificación del diseño (c) Vista general del canal: evacuar sin daño

COSTOS Y RENDIMIENTOS DE CONSTRUCCIÓN DE LOS CANALES DE DESVIACIÓN DE AGUAS LLUVIAS

Previamente a la revisión de algunas experiencias con la construcción de canales de desviación, cabe hacer notar que, al igual que las zanjas de infiltración, el Estado de Chile considera en el marco de la Ley 19.561 de fomento forestal, la bonificación sobre costos totales de construcción de canales de desviación de aguas lluvias. Asimismo, el alto requerimiento técnico y profesional en el diseño de ingeniería y la funcionalidad de estas obras provoca que la construcción de canales no sea de uso masivo, en áreas con suelos degradados.

Por otra parte, un estudio realizado por la Universidad de Talca y la Sociedad EIAS Ltda. (Pizarro *et al*, 2004), establece que para obras realizadas entre 1998 y 2002, en las regiones IV, VI, VII y VIII, el costo promedio de construcción de canales de desviación, alcanza los **3.829** \$/m³, evidenciando un valor mucho más bajo que los **27.225** \$/m³, estimados en la tabla de CONAF (2003). El costo de construcción más alto corresponde a la localidad de El Hoyo (VII Región), lo cual se explica porque pertenece a un módulo demostrativo, mientras que, el más bajo se presenta en el predio Santa Sofía, en la VIII Región.

En cuanto al rendimiento en los trabajos de construcción, en las regiones IV, VI, VII y VIII, éste presenta una alta variabilidad que estaría correlacionada a la experiencia y eficiencia del operador forestal y a las condiciones de pendiente, la vegetación y las características geomorfológicas que presenta cada una de las localidades. En este contexto, los rendimientos más altos se registraron en el predio Santa Sofía (VIII Región) alcanzando valores de 5,9 m³/jornal, seguido por el módulo demostrativo El Hoyo (VII Región), con un rendimiento de 3,1 m³/jornal.

Así también, el Proyecto FDI - CORFO «Determinación de estándares de ingeniería en obras de conservación y aprovechamiento de aguas y suelos, para la mantención e incremento de la productividad silvícola en *Pinus radiata* (D.Don)», implementó dos módulos experimentales con canales de desviación, con el propósito de evaluar la erosionabilidad de dos cárcavas, ubicadas en Paredones (VI Región) y Llanillos (VII Región), sectores altamente erosionados y degradados por las malas prácticas prediales. Para lo cual, el diseño y la configuración geométrica de las obras, se realizó con la determinación y el ajuste de parámetros hidrológicos e hidráulicos, asumiendo los siguientes valores entregados en las figuras 14 y 15.

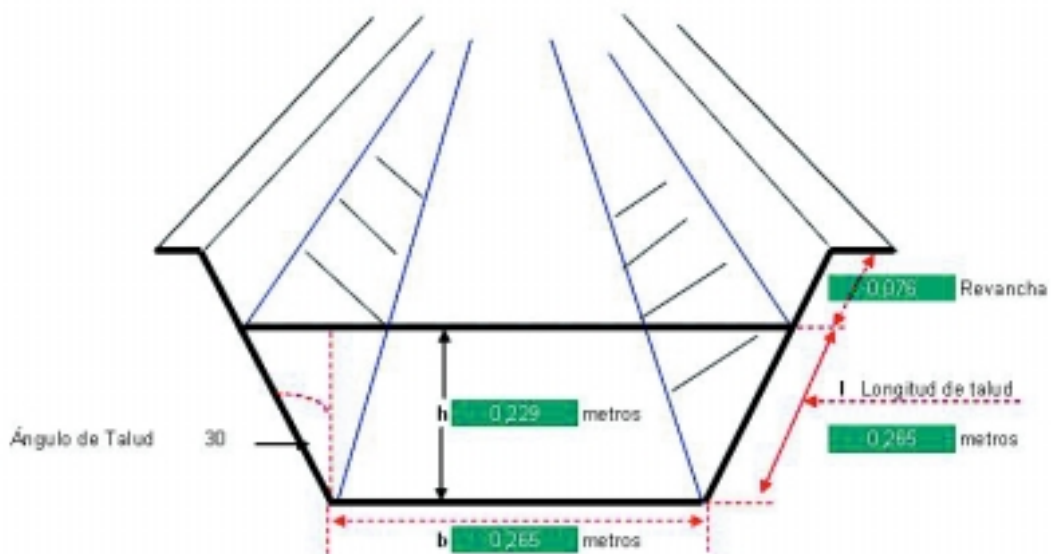


Figura 14. Configuración geométrica de los parámetros hidráulicos del canal de Paredones (VI Región).

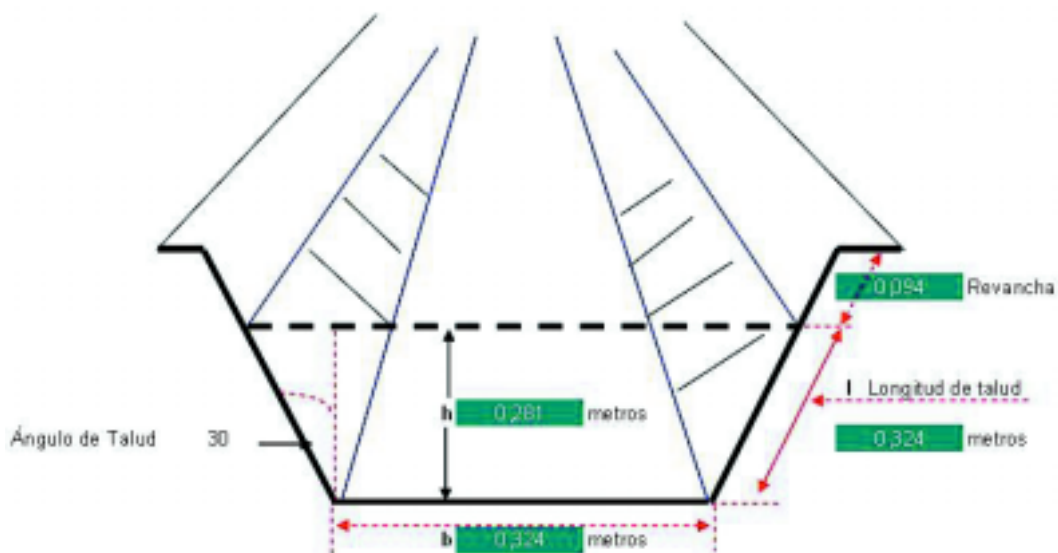


Figura 15. Configuración geométrica de los parámetros hidráulicos del canal de Llanillos (VII Región).

Así, la construcción del canal de desviación de las aguas lluvias en el sector de Llanillos, con un suelo franco arcilloso y la presencia de sectores rocosos, determinó los siguientes estándares para el sector de Llanillos (VII Región);

Número de personas que trabajaron : 4 personas
 Número de metros cúbicos excavados: 15,80 m³
 Número de días trabajados : 4 días.
 Número de días utilizados en trazado : 0,5 días.

Rendimiento por persona y por día	: 1,13 m ³
Rendimiento por persona y por hora	: 0,14 m ³
Herramientas utilizadas por personas	: Pala - chuzo - picota
Valor metro cúbico por hombre	: 8.500 pesos.

Cabe destacar que la textura limo arcilloso del suelo y la larga temporada sin presencia de lluvias, hizo aún más difícil la remoción del material y por ende el rendimiento por persona disminuye ante un suelo previamente húmedo. Asimismo, el alto grado de sedimentación en ese sector, provoca que la sección teórica diseñada disminuya notoriamente, por lo que, es necesario realizar a lo menos una vez al año la mantención y limpieza de la obra.

Análogamente, en el sector de Paredones (VI Región), cuya clase textural del suelo de tipo arcillo arenoso, más la presencia de rocas en el trazado del canal de desviación, y sumado a esto, la ausencia de lluvias, determinó el uso de arado con un caballo que facilitó las labores de movimiento inicial de tierra. Con ello, se presentaron los siguientes estándares de construcción;

Número de personas que trabajaron	: 5 personas
Número de metros cúbicos excavados	: 23,80 m ³
Número de días trabajados	: 4 días
Número de días utilizados en trazado	: 0,5 días
Rendimiento por persona y por día	: 1,19 m ³
Rendimiento por persona y por hora	: 0,15m ³
Herramientas utilizadas por personas	: Pala - chuzo - picota
Valor metro cúbico por hombre	: 8.500 pesos

Al igual que en el sector de Llanillos, se hace necesario realizar una mantención y limpieza anual a dicha obra, debido al grado de material que se sedimenta y deposita en su interior, como: ramas, piedras, sedimentos, entre otros.

Finalmente, resta destacar que por sobre la determinación matemática de un canal, cobra especial relevancia el replanteo de la obra en terreno, así como llevar a cabo una cuidadosa y eficiente construcción, todo lo cual define la obtención de una utilidad marginal significativa en el contexto económico, así como una practicidad efectiva y eficiente a las demandas del sistema social en zonas rurales.

Capítulo 4: Obras de retención de sedimentos y corrección de cauces (Diques)

La erosión hídrica constituye, en Chile, la principal señal del proceso de desertificación. En este marco, las plantaciones forestales y la vegetación esclerófila tienen un importante valor para la protección del suelo y la regulación de las aguas, entre otras funciones. Así, la restauración de la cubierta vegetal tiene enorme importancia para paliar estos procesos degenerativos, especialmente en las cuencas de las zonas del secano interior y costero de las regiones VI, VII y VIII.

En este sentido, la construcción de obras de conservación de aguas y suelos, y en especial, los diques de retención de sedimentos permiten hacer frente a los fenómenos de desertificación y de degradación ambiental.

El presente capítulo contempla, en primer lugar, una guía básica de construcción de diques de retención de sedimentos, inserto en el programa INDAP-PRODECOP para pequeños propietarios de la ciudad de Curepto, en el año 2001, y que fue elaborado por un equipo de trabajo de ingenieros forestales de la Universidad de Talca, y en segundo lugar, un manual de cálculo de diques de corrección torrencial, elaborado por el Dr. Ing. José Luis García R. de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Investigador/consultor del proyecto EIAS.

Desde el punto de vista metodológico, los procedimientos que existen para eliminar, o al menos paliar los daños que suelen ocasionar la erosión y el arrastre de sedimentos, se pueden clasificar en dos grandes grupos, a saber;

1. Diseño empírico
2. Diseño hidráulico

En ambas situaciones, sus beneficios se visualizan con la reducción de las puntas de caudal de las crecidas más frecuentes, así como con la disminución de la erosión. Asimismo, los diseños de obras de conservación necesitan de un análisis interdisciplinario cuya correcta solución exige del concurso de un gran número de especialistas, pero que suele precisar pequeñas inversiones en relación con los beneficios indirectos que produce, especialmente a las zonas de regímenes semiáridos.

Así, se definen, según su funcionalidad, en dos tipos de diques:

- i. Diques de estabilización de ladera. Éstos tienen por objetivo, cumplir 3 condiciones particularmente sensibles en las áreas degradadas, a saber:
 - Resistir el desgaste del fondo de las cárcavas por efecto del arrastre ejercido por el agua.

- Estabilizar eficientemente las pendientes del lecho en las cárcavas.
 - Preparar las condiciones para la plantación y la siembra en cárcavas.
- ii. Diques de corrección de cauces. Éstos son barreras que cruzan un curso de agua o un conducto y se utilizan para controlar el nivel y velocidad del agua. Esta construcción se aplica en puntos localizados y es especialmente interesante para proteger algunas poblaciones y, singularmente, las vías de comunicación.

Visión empírica del diseño de diques para la retención de sedimentos

Construcción de diques

En la ejecución o construcción del dique deben seguirse los siguientes pasos.

Paso 1. Selección de la zona en la quebrada donde se construirán los diques: Dependiendo de la longitud de la cárcava a controlar, debe decidirse si se construirán uno o más diques. Si la cárcava es relativamente corta (menos de 20 metros), bastará con la construcción de un solo dique. Por el contrario, debe considerarse la construcción de uno o más diques, ya que al establecer el sistema de diques, lo que se desea es controlar la pendiente o inclinación del fondo de la cárcava, por lo que se recomienda establecerlos de manera que la altura útil del dique aguas abajo, coincida con la base del dique situado aguas arriba (figura 16).



Figura 16. Disposición de diques en ladera

Paso 2. Suavizar los taludes: Tal como se muestra en la figura 17, se deben suavizar los taludes, antes de la construcción de los diques. Así, se evitará su desmoronamiento y se favorecerá su estabilidad y la de los diques a construir.

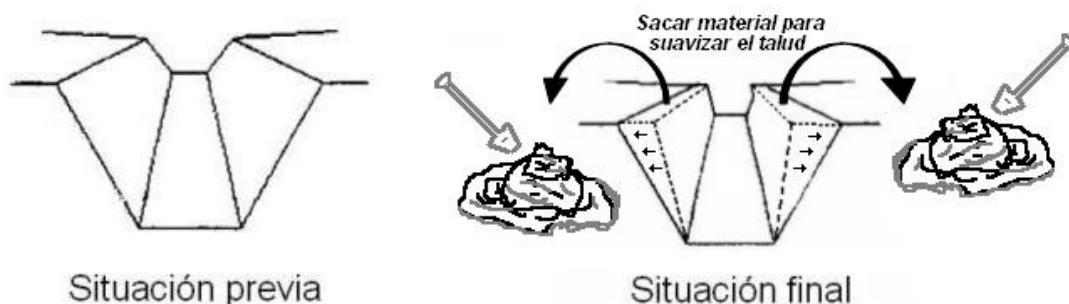


Figura 17. Mejoras en el talud de un dique

La inclinación que se recomienda dar al talud corresponde a la razón de 3:2, en la cual por cada 3 metros de altura, se avanza 2 metros en la horizontal.

Paso 3. Excavar los empotrados: Debe excavarse en la zona de la construcción del dique una zanja del mismo ancho de la obra, con una profundidad entre 70 a 90 centímetros. Esta zanja contendrá los cimientos del dique y lo mantendrá unido firmemente al suelo de la cárcava. Por ningún motivo puede construirse un dique si no se ha excavado una zanja tal que permita su anclaje al terreno. La figura 18, indica que el empotrado también se debe realizar en los taludes de la cárcava, por lo que la excavación también debe realizarse en esa zona.

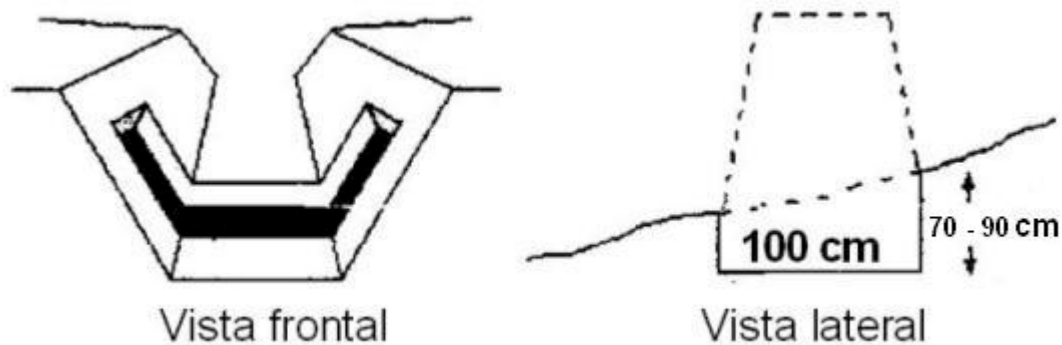


Figura 18. Empotramiento de un dique

Paso 4. Construcción del muro: Se construirá el muro desde los cimientos hasta la altura útil del dique (figura 19). Debe ponerse especial cuidado en esta etapa de dar una cierta inclinación hacia adentro en ambos lados del muro, de manera que la estructura se mantenga en pie por su propio peso. El ancho del dique no debe ser inferior a 1 metro (100 cm). La altura útil del dique debe ser la misma que su ancho, en este caso, 1 metro (100 cm).

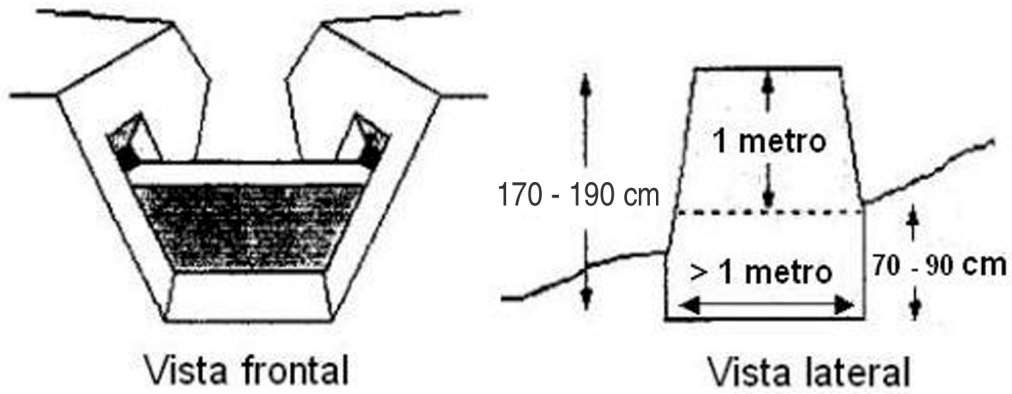


Figura 19. Construcción de un muro de contención de sedimentos



Figura 20. Vertedero de un dique

Paso 5. Construcción del vertedero: Por esta zona transitará el agua que circule por la cárcava (ver figura 20). El largo del vertedero puede ser de 2 metros (200 cm), y su alto de medio metro (50 cm), aunque ello es función de las características locales.

Es importante que el agua evacuada circule exclusivamente por el vertedero, ya que si se desborda por los costados, se dañará seriamente la estructura del dique.

Paso 6. Construcción del dissipador del dique aguas abajo: El dissipador es una estructura que forma parte en la construcción de cualquier dique (figura 21). Su finalidad es evitar la destrucción del dique en la zona de la caída del agua. Por lo general, se construye del mismo material del dique, debiendo además, quedar firmemente adherido al terreno mediante un correcto empotrado. Su tamaño es de 1 metro por el largo del dique, con una profundidad en el empotrado de 50 cm, a lo menos.



Figura 21. Disposición correcta de un dissipador de energía

Materiales de construcción

Ahora bien, dependiendo de los materiales disponibles, se recomiendan tres tipos de diques a construir.

Dique de piedra sobre piedra (mampostería en seco)

Es uno de los tipos de diques de menor costo. Sólo requiere que se corte la piedra en algún lugar cercano al sector donde se construyen los diques. El dique se mantiene en pie por su propio peso, por lo cual se recomienda asegurar que la obra quede reforzada y bien empotrada en el terreno (fotografía 21).



Fotografía 21. Dique de mampostería en seco (V Región)

Lo ideal es cantar las piedras para facilitar su colocación y dar mayor estabilidad a la obra, y siempre es necesaria la excavación de los empotrados. El dissipador que evita la destrucción del dique en la zona de la caída del agua, se construye en todo lo largo del dique, con los mismos materiales.

Dique de piedra con cemento (mampostería hidráulica)



Es muy similar al tipo anterior, pero la mampostería hidráulica considera una mezcla de piedras, cemento y arena (fotografía 22). Además, involucra un diseño hidrológico e hidráulico más complejo que otros tipos de diques. Su costo es mayor en comparación con el anterior. Siempre se requiere de la excavación de los empotrados.

Fotografía 22. Diques de mampostería hidráulica (V Región)

Dique de postes impregnados y sacos de tierra

En este tipo de diques (figura 22 y fotografía 23) se usan polines de pino impregnados de 4 pulgadas. Los postes van enterrados y sujetos con clavos y alambre. Se construyen dos muros de polines firmemente unidos, y se asientan con sacos llenos de tierra.

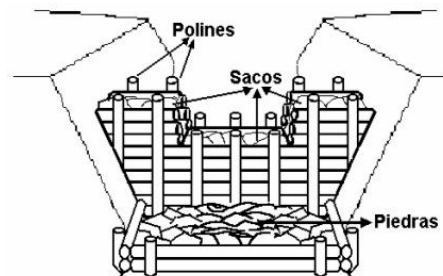


Figura 22. Dique de polines con sacos de arena o tierra

Al igual que en los anteriores casos, la excavación de los empotrados es obligatoria.



Fotografía 23. Dique de postes impregnados (VIII Región)

Errores en la construcción de diques de polines

Al construir un dique de polines debe considerarse evitar el socavamiento, la filtración, los taludes inestables y el desempotramiento (fotografías 24, 25, 26, 27 y 28). Para, ello debe reforzarse cada uno de los puntos críticos en el diseño y construcción de estas obras.



Fotografía 24. Filtración



Fotografía 25. Desempotramiento



Fotografía 26. Socavamiento



Fotografía 27. Taludes inestables aguas abajo del dique



Fotografía 28. Desmoronamiento de taludes aguas arriba del dique

Finalmente, es importante señalar que sobre el diseño descrito puede surgir algún cuestionamiento, por lo que, lo expresado anteriormente más que una metodología, constituye una proposición. A continuación se describirá, el diseño y cálculo de diques de corrección de cauces, bajo un concepto matemático e hidráulico.

Diseño y cálculo de diques de gravedad de mampostería hidráulica para control de torrentes

Reciben este nombre los que se conciben y calculan para resistir, por su propio peso, el empuje de las aguas y los sedimentos que retienen.

Existen diversas configuraciones geométricas de un dique, lo que coincide directamente sobre un nuevo diseño y trazado (construcción) y el encarecimiento o no, en los costos de la obra. Así, se pueden indicar tres formas básicas de construcción (figura 23).

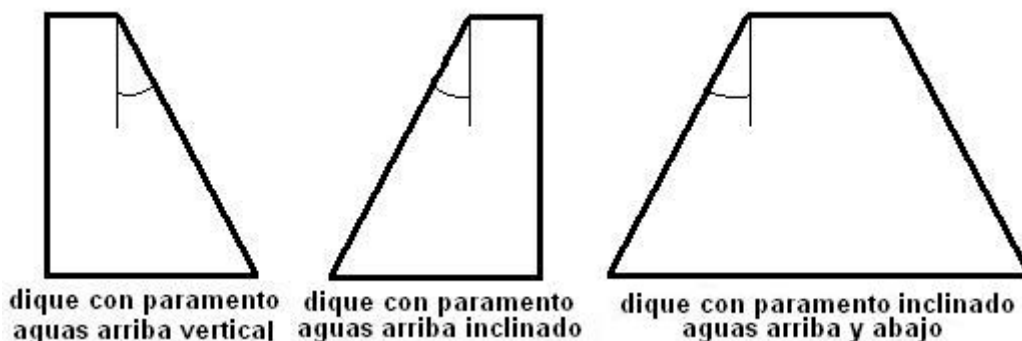


Figura 23. Formas geométricas de un dique

Ahora bien, es posible comprobar que, debido tanto a las solicitaciones que inciden sobre la obra, como por los detalles constructivos, el perfil más conveniente es el trapecial con el paramento aguas arriba vertical y aguas abajo inclinado, aunque en la corrección de cauces torrenciales, también se construyen diques de paramento aguas arriba inclinado, ya que en este caso el peso del agua que gravita sobre el mismo, favorece la estabilidad de la fábrica (u obra).

Dimensiones del dique

Hay cinco elementos de diseño que son fundamentales en un dique: su altura, el caudal de evacuación, el espesor en coronación, el vertedero y el espesor en la base donde se une con la cimentación.

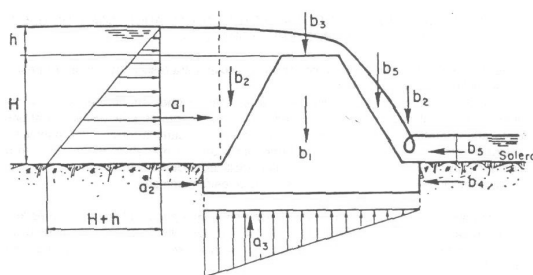


Figura 24. Dique con paramento agua arriba vertical

El dique se supondrá de paramento aguas arriba vertical; que es el perfil más económico. Asimismo, se calculan por separado las dimensiones de la obra vista y de las cimentaciones, suponiendo que se trata de obras que no superan los 15 m., incluyendo la cimentación. Además, considérese que estos diques pueden ser construidos en quebradas de cursos efímeros y/o temporales (fotografía 29).



Fotografía 29. Ubicación de un dique (mampostería hidráulica) en una quebrada

- a. **Altura del dique (H):** La altura está condicionada al problema torrencial que se pretende corregir; a la disposición del emplazamiento elegido; y al aterramiento que se prevé que se llegará a formar tras el dique, una vez realizada su consolidación.
- b. **Caudal (Q):** El caudal de evacuación del vertedero está determinado por la utilización de la ecuación racional (23);

$$Q = C \cdot I \cdot A_i$$

Donde:

- C : Coeficiente de escorrentía ponderado para la cuenca (ver capítulo 3).
 I : Intensidad de precipitación determinado para un tiempo de concentración (T_c) de la cuenca.
 A_i : Superficie de aportación de aguas lluvias.

Para la determinación de la intensidad de precipitación (I) de acuerdo a las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia, se debe conocer el tiempo de concentración (T_c), el cual corresponde al tiempo que le toma transitar a una partícula de agua desde el punto más alejado de la cuenca, hasta el punto de desagüe (Pizarro, 1993); en otras palabras, es el tiempo necesario para que la escorrentía de un chubasco llegue hasta el desagüe, desde el punto de la cuenca con mayor tiempo de recorrido (<http://www.cig.ensmp.fr>). Este tiempo es posible obtenerlo con las siguientes fórmulas empíricas:

i. Giandotti: es aplicable a pequeñas cuencas con pendientes fuertes, tales como cuencas cordilleranas. Su expresión es la siguiente:

$$T = \frac{4A^{0,5} + 1,5 L}{0,8H^{0,5}} \quad (32)$$

Donde:

- T_c : Es el tiempo de concentración (h).
 A : Es el área de la cuenca (Km).
 L : Longitud del cauce principal.
 H : Altura media, descontando la cota de la cuenca sobre el punto estudiado (m).

ii. U.S. Soil Conservation Service: Su uso se recomienda para cuencas de tamaño mediano a grande. En áreas menores a 2 Km², esta relación presenta problemas de subestimación.

$$T_c = 0,95 \cdot \left(\frac{L^3}{\partial H} \right)^{0,385} \quad (33)$$

Donde:

- L : Longitud del cauce principal (Km).
 ∂H : Diferencia de elevación (m), entre el punto más alto del cauce principal y el punto estudiado.

iii. Kirpich: Es aplicable a pequeñas cuencas agrícolas:

$$T_c = 0,066 \cdot \frac{L^{0,77}}{j^{0,385}} \quad (34)$$

Donde:

$$j = \frac{C_{m\acute{a}x} - C_{m\acute{i}n}}{L} \quad (35)$$

El parámetro j corresponde a la razón entre la diferencia de cotas del punto más alejado de la cuenca ($C_{m\acute{a}x}$) y el punto de desagüe ($C_{m\acute{i}n}$) y la longitud del cauce principal (L).

Una vez obtenido el valor del tiempo de concentración, es posible asociarlo a una intensidad de diseño, con la utilización de las curvas IDF (gráfico 5).

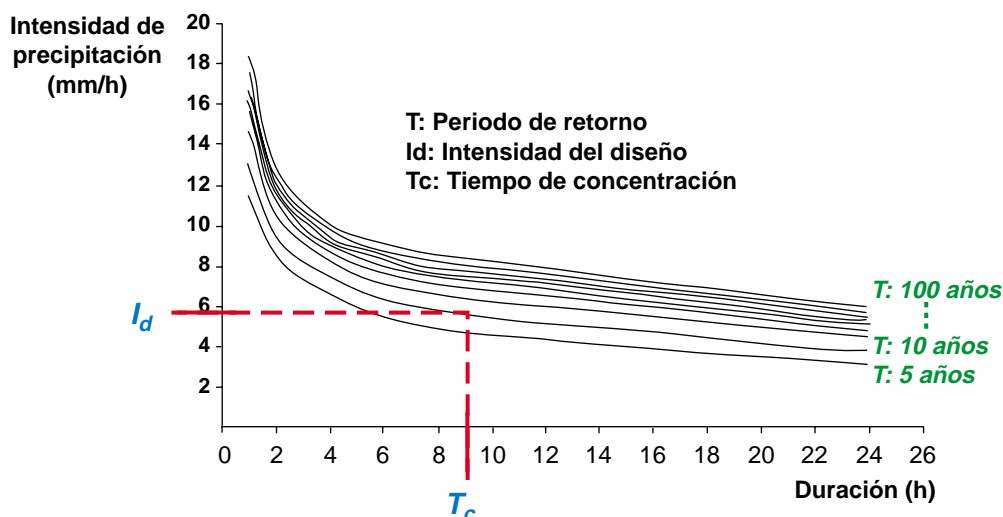
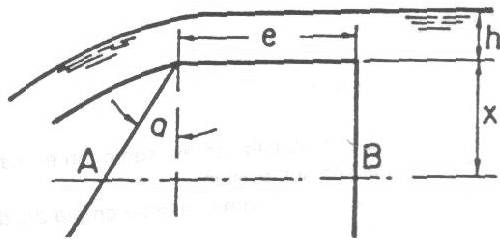


Gráfico 5. Determinación de la intensidad de diseño (I_d), a partir del tiempo de concentración (T_c)

Por otra parte, S en la ecuación racional, que corresponde a la superficie de aportación de escorrentía, será determinado por los instrumentos y metodologías de planimetría, fotografía o georreferenciales disponibles por el ingeniero de la obra, mientras que, el coeficiente de escorrentía (C), puede ser calculado a partir del cuadro 15, del capítulo 3, citando a Chow *et al* (1994), o simplemente, asociando un valor empírico del área de estudio (entre 0 y 1) cercano a 0,9 como un elemento de seguridad, y por cuanto, se asegura que casi la totalidad del agua caída en las laderas de las quebradas llegará a pasar por el vertedero del dique.

c. Espesor en coronación (e): Su cálculo se realiza a partir de la consideración de que en dicha sección la obra resiste al deslizamiento (figura 25).



Luego, el espesor en coronación queda;

$$e = \frac{\gamma \cdot h \cdot c}{\gamma_s \cdot f} \quad (36)$$

Figura 25. Espesor en coronación

Donde:

- e : Espesor en coronación del dique (m).
- γ : Peso específico de la suspensión (agua con suspensiones) (Kg/m^3).
- h : Altura de la lámina vertiente (m).
- c : Coeficiente de seguridad, que varía de 1,0 a 1,3.
- γ_s : Peso específico del material constitutivo de la obra (Kg/m^3).
- f : Coeficiente de rozamiento de la obra o fábrica.

d. Vertedero. Esta estructura permite evacuar el exceso de agua de avenidas. Así, la configuración del vertedero puede ser rectangular, triangular o trapecial (figura 26).

Vertederos

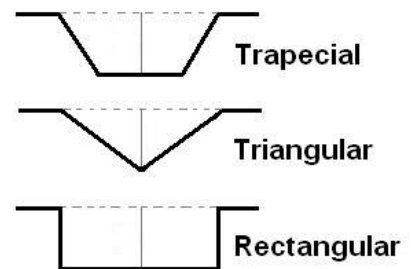


Figura 26. Tipos de vertederos

Para el cálculo de la altura de la lámina vertiente, h, se establece la condición de gasto crítico en la sección del vertedero. Generalmente se supone en caída libre y con aireación inferior suficiente; aunque con caudales importantes se proyectan también perfiles del tipo Creager, con la lámina adherida al vertedero. De esta forma, h se expresa;

Sea, el área del vertedero de tipo rectangular, S:

$$S_{\text{rectángulo}} = b \cdot h \quad (37)$$

Donde;

- b : Anchura del vertedero.
- h : Altura del vertedero.

y la condición de equilibrio, está dada por:

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{S^3}{b} \quad (38)$$

Donde:

Q : Caudal determinado por la ecuación racional (m^3/s).

g : Aceleración de gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$).

b : Anchura del vertedero.

Luego, si se expresa S, en función de b y h, queda:

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{(b \cdot h)^3}{b} \Rightarrow \frac{Q^2}{g} = b^2 \cdot h^3$$

Así, la altura crítica del calado del vertedero (h), es igual a:

$$h = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g \cdot b^2}} \quad (39)$$

Ahora bien, si el calado del vertedero tiene una forma trapecial, el área es:

$$S_{\text{trapezoidal}} = b \cdot h - 2 \left(\frac{\frac{h}{\tan \alpha} \cdot h}{2} \right) = (b \cdot h) - h^2 \cotan \alpha$$

entonces;

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{(b \cdot h) h^2 \cotan \alpha}{b} \quad (40)$$

e. Espesor en la base (B): Se establecen las condiciones de estabilidad al vuelco y al deslizamiento, considerando el conjunto de todas las fuerzas actuantes, tanto favorables como desfavorables (figura 27).

Así, el valor de la base, se expresa como:

$$B = aH + e \quad (41)$$

Donde:

B : Espesor en la base del dique.

H : Altura útil de la obra.

a : Tangente del ángulo del talud en el vertedero.

e : Espesor en coronación del dique (m).

Seguidamente se adjuntan una serie de valores relativos al peso específico, tanto de la suspensión como de los materiales utilizados en la obra.

Cuadro 17. Pesos específicos para distintos materiales

Material	Peso específico (Kg/m ³)
Agua	1.000
Suspensión	1.200
Mampostería	
granito	2.600
caliza dura	2.400
arenisca	2.300
caliza blanda	2.200
hormigón en masa	2.300

Análisis de las solicitaciones

Si bien es importante conocer las partes principales de un dique, resulta aún más fundamental, hacer el análisis de las solicitaciones (fuerzas y torques) y los cálculos necesarios de ingeniería y diseño, para el buen establecimiento de la obra. Este manual considera un dique con los paramentos inclinados, tanto aguas arriba como aguas abajo, con el fin de tener en cuenta todas las posibles acciones que actúan sobre la obra (con y sin aterramiento)

Fuerzas desestabilizadoras

- El empuje hidrostático: a_1
- El empuje pasivo del terreno sobre el paramento aguas arriba y el empuje pasivo del terreno sobre la cimentación: a_2 y a_2^*
- La subpresión: a_3
- Las fuerzas dinámicas, cualquiera que sea su procedencia
- Las solicitaciones originadas por depresiones.
- Los empujes laterales producidos por laderas inestables.

Fuerzas estabilizantes

- El peso propio de la obra o estructura: b_1
- La componente vertical del agua sobre el paramento aguas arriba de la estructura, siempre que sea inclinada y/o saliente de la fundación: b_2
- El peso de la lámina vertiente sobre el vertedero: b_3
- El empuje pasivo del terreno sobre la cimentación aguas abajo de la fundación: b_4
- El empuje del agua sobre el paramento aguas abajo: b_5

De todas estas solicitaciones se consideran fundamentales, tanto en el caso de las fuerzas desfavorables como de las favorables, las tres primeras, mientras que

las restantes solicitaciones se califican de accidentales, teniéndolas en cuenta cuando la situación concreta así lo aconseja. (figuras 27 y 28).

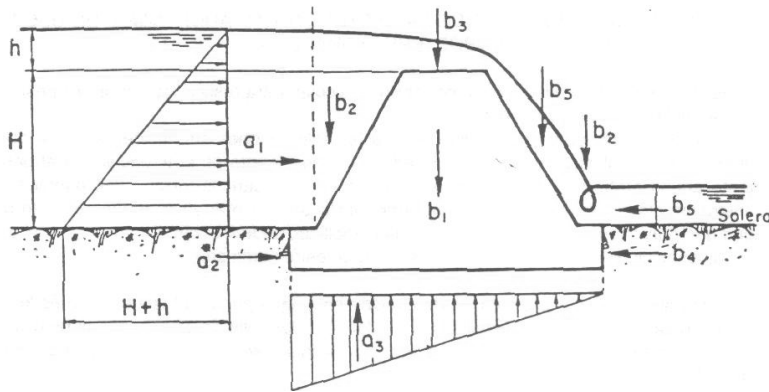


Figura 27. Dique, condición sin aterramiento

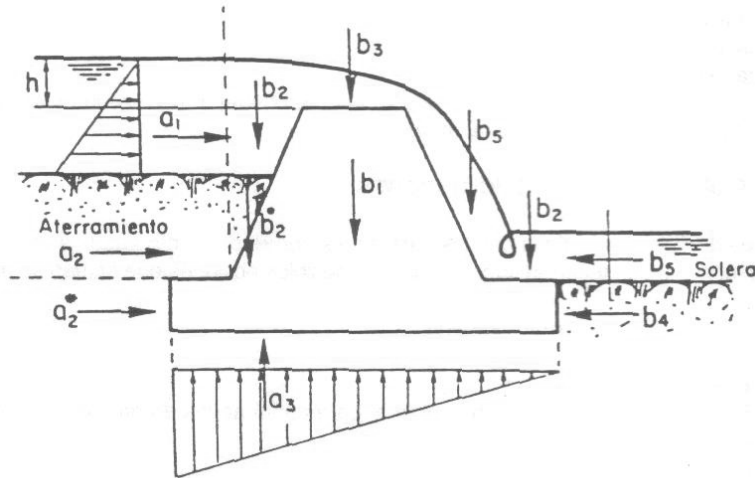


Figura 28. Dique, condición con aterramiento

Para el análisis de fuerzas de un dique se debe considerar lo siguiente:

- Condición de núcleo central

$$\sum \tau = 0$$

La suma de todos los torques es igual a cero.

- No deslizamiento del dique

$$\sum F(x,y) = 0$$

La suma de todas las fuerzas es igual a cero.

El análisis de fuerzas y torques de un dique, responde a la consideración de dos hipótesis, a saber:

Hipótesis I:

- Repartición triangular para el empuje hidroestático E.
- Se prescinde de la subpresión (cimentación del dique sobre roca no alterada).

Hipótesis II:

- Repartición trapezoidal para el empuje hidroestático E.
- Se considera la subpresión.

A continuación, se describirá y analizará cada una de las hipótesis I y II, para los diques con paramento aguas arriba vertical.

En ambos casos, considérese las siguientes coordenadas del centro de gravedad del dique:

$$x = \frac{(aH + e)^2 + e(aH + e) + e^2}{3(aH + 2e)} \quad (42)$$

$$y = \frac{H(aH + 3e)}{3(aH + 2e)} \quad (43)$$

Siendo;

- a : Tangente del ángulo del talud del dique en coronación ($\text{tg}\alpha = a$).
- H : Altura útil del dique.
- e : Espesor en coronación.
- h : Altura crítica del calado del vertedero.

Hipótesis I.

Las fuerzas actuantes y los brazos de las fuerzas actuantes $\beta(F)$ son, respectivamente:

$$P = \frac{H(aH + 2e)\gamma_s}{2} \quad (44)$$

$$\beta(P) = \frac{(aH + e)^2 + e(aH + e) - e^2}{3(aH + 2e)} \quad (45)$$

$$E = \frac{H^2}{2} \cdot \gamma \quad (46)$$

$$\beta(E) = \frac{H}{3} \quad (47)$$

Donde:

P : Peso de la fábrica (Kg).

E : Empuje hidrostático (Kg).

H : Altura útil de la obra.

a : Tangente del ángulo del talud en el vertedero.

e : Espesor en coronación del dique (m).

γ : Peso específico de la suspensión (agua con suspensiones) en Kg/m³.

γ_s : Peso específico del material constitutivo de la obra en Kg/m³.

K : Coeficiente que oscila entre los siguientes valores:

K = 0 en roca compacta.

K = 0,5 en roca alterada.

K = 1,0 en suelos incoherentes.

Luego, las ecuaciones de equilibrio son:

- Condición de núcleo central:

$$P \cdot \beta(P) - E \cdot \beta(E) = 0 \quad (48)$$

- Condición de no deslizamiento:

$$\frac{E}{P} \leq f \quad (49)$$

Hipótesis II.

Las fuerzas actuantes F y los brazos de las fuerzas actuantes $\beta(F)$ son respectivamente:

$$P_o = e \cdot h \cdot \gamma \quad (50) \quad \beta(P_o) = \frac{(4aH + e)}{6} \quad (51)$$

$$P = \frac{H(aH + 2e)\gamma_s}{2} \quad (52) \quad \beta(P) = \frac{(aH + e)^2 + e(aH + e) - e^2}{3(aH + 2e)} \quad (53)$$

$$S_P = \frac{(aH + e)(H + h) \cdot k \cdot \gamma_o}{2} \quad (54) \quad \beta(S_P) = \frac{(aH + e)}{3} \quad (55)$$

$$E = H \cdot \left(\frac{H}{2} + h \right) \cdot \gamma \quad (56) \quad \beta(E) = \frac{H(H + 3h)}{3(H + 2h)} \quad (57)$$

siendo:

P_0 : Empuje del agua en coronación (Kg).

P : Peso de la fábrica (Kg).

S_p : Subpresión (Kg).

E : Empuje hidrostático (Kg),

γ_0 : Peso específico del agua (Kg/m³).

A continuación, se plantean las siguientes ecuaciones de equilibrio:

- Condición de núcleo central:

$$P_0 \cdot \beta(P_0) + P \cdot \beta(P) - S_p \cdot \beta(S_p) - E \cdot \beta(E) = 0 \quad (58)$$

- Condición de no deslizamiento:

$$\frac{E}{P_0 + P - S_p} < f \quad (59)$$

Donde,

S_p : Subpresión que tiende a cero si el dique se apoya sobre una zapata sólida construida para tal fin.

Cimentaciones de la obra

Además del cálculo de la obra vista, es preciso comprobar si las tensiones que actúan sobre el suelo, a consecuencia del peso de la fábrica, resultan admisibles.

La longitud de la cimentación no solo debe conseguir el efecto anteriormente indicado, sino también debe garantizar la estabilidad de la obra frente a las socavaciones producidas por la lámina vertiente al pie de la misma. En este contexto, la distancia o el alcance que logra la lámina vertiente, desde el extremo del vertedero, viene dada por:

$$D = \sqrt{2 Hh + h^2} \quad (60)$$

donde

D : Alcance de la lámina vertiente (m).

H : Altura útil del dique (m).

h : Altura crítica del calado del vertedero (m).

Por lo tanto, la longitud de la cimentación queda definido por $L_c = D + e$ (en metros). Establecidos en una primera aproximación las dimensiones de L_c , la profundidad de la cimentación, expresada por «c», generalmente se establece un valor de 1 m.

Para el cálculo de la subpresión en el plano de contacto de la cimentación con el terreno, se considera un reparto trapecial, admitiendo que la altura de carga del agua, n , alcanza hasta la primera fila de los mechinales (orificios en el dique para la regulación del flujo hídrico). De acuerdo con ello, sus dimensiones son:

$$l_{arriba} = n - \left[\frac{c}{2c + \frac{L_c}{3}} \right] \cdot n \quad (61) \quad \text{y} \quad l_{arriba} = n - \left[\frac{c + \frac{L_c}{3}}{2c + \frac{L_c}{3}} \right] \cdot n \quad (62)$$

El cálculo de las tensiones (σ) que debe soportar el suelo, como consecuencia del peso de la obra, es:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{\sum F_v}{L_c} \left(1 + \frac{6\psi}{L_c} \right) \quad \text{en el extremo aguas abajo} \quad (63)$$

$$\sigma_{m\acute{i}n} = \frac{\sum F_v}{L_c} \left(1 - \frac{6\psi}{L_c} \right) \quad \text{en el extremo aguas arriba} \quad (64)$$

Donde;

$\sum F_v$: sumatoria de todas las fuerzas verticales que actúan sobre la obra

ψ : la excentricidad, su valor viene dado por $\psi = m - \frac{L_c}{2} < \frac{L_c}{6}$ (para que no existan esfuerzos de tracción), y $m = \frac{\sum M}{\sum F_v}$ siendo

$\sum M$, la sumatoria de los momentos de todas las sollicitaciones que actúan sobre el dique.

Empíricamente, se sabe que la tensión asume ciertos valores para :

Suelos de gravas	$\sigma = 5 - 10 \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$
Suelos de arenas gruesas	$\sigma = 3 - 5 \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$
Suelos de arenas medias	$\sigma = 1,5 - 3 \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$

Para asegurar la estabilidad del dique al deslizamiento, en la junta de la base de la cimentación con el suelo, debe verificarse:

$$\frac{\sum F_h}{\sum F_v} < f \quad (65)$$

Siendo ΣF_h y ΣF_v las sumatorias de todas las fuerzas horizontales y verticales que actúan sobre el dique; y f el coeficiente de rozamiento que toma los siguientes valores (cuadro 18):

Cuadro 18. Valores de rozamiento en cimentación en distintos tipos de materiales

Materiales	f
Cimentación en roca no alterada	0,75
Cimentación en roca descompuesta	0,60
Cimentación en gravas	0,50
Cimentación en arenas	0,40
Cimentación en arcillas	0,30

Elementos complementarios

Un dique de corrección de torrentes no es únicamente una estructura que resista al empuje de las aguas que retiene, sino que, de alguna manera, es un elemento condicionante del flujo de avenida, por lo que sus complementos estructurales son de una gran importancia.

En primer lugar, la profundidad de estas socavaciones que acaba siendo independiente de la granulometría de los materiales de terreno, se sintetiza en la siguiente ecuación.

$$h_s = 1,9 \cdot (H_t^{0,225}) \cdot q^{0,54} \quad (66)$$

- h_s : Profundidad máxima de la socavación, en metros.
 H_t : Desnivel entre la lámina de agua en el vertedero del dique, y la misma lámina en el cauce libre de aguas abajo en metros.
 q : Caudal de descarga por unidad de anchura (m^2/s)

En segundo lugar, los disipadores de energía se basan en el fenómeno conocido como «Resalto Hidráulico», que tiene lugar cuando en la circulación de las aguas se produce un cambio brusco del régimen rápido al lento, de forma que la velocidad se reduce, transformándose en energía potencial con un choque interno de las aguas, y una importante pérdida de energía, que se manifiesta por una elevación brusca de la superficie del agua, acompañada de remolinos.

Citando a García (s/a), el fenómeno como tal fue estudiado por Belanger (1838), se aplica el sistema de ecuaciones formado por la ecuación de continuidad y la ecuación del impulso o de la cantidad de movimiento, estableciendo la conocida «ecuación de los calados conjugados», a saber:

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right) \quad (67)$$

Donde:

h_1 : Calado del agua al pie de la obra de corrección (en metros)

h_2 : Calado conjugado de h_1 (en metros).

F_1 : Número de Froude al pie del dique, correspondiente al calado h_1 .

La ecuación anterior puede expresarse también como:

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \cdot \left(\frac{h_1^2}{4} + \frac{2q^2}{g \cdot h_1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (68)$$

siendo q , el caudal de descarga (el que pasa por el vertedero) por unidad de anchura.

Para el cálculo del valor h_1 se establece la Ecuación de la conservación de la energía entre la sección de vertido del dique y la sección al pie del mismo, en donde se forma el calado h_1 buscado. Su expresión viene dada por:

$$h_1^3 - \left[H + h + \frac{q^2}{2g \cdot h^2} \right] h_1^2 + \frac{q^2}{2g \cdot k^2} = 0 \quad (69)$$

Donde h_1 es el calado sobre el vertedero y k una constante que en el caso de la mampostería hidráulica o similar se toma $k^2 = 0,85$.

El objetivo de un dissipador de energía es, como se ha dicho, conseguir la transición del régimen rápido que se forma al pie del dique, definido por el calado h_1 , al régimen correspondiente a la circulación de la corriente en cauces abiertos, de calado h_3 , establecido por cualquiera de las fórmulas de Manning, Bazin u otros autores. Por tanto, la aplicación del resalto hidráulico vendrá condicionado a la situación relativa de las láminas definidas por los calados h_1 , h_2 y h_3 .

Si $h_2 < h_3$, se produce siempre la formación del resalto hidráulico para el caudal de cálculo q , no siendo necesario acudir a ninguna estructura de disipación para evitar la erosión.

Si $h_2 > h_3$, situación normal en los cauces torrenciales, debe proyectarse la estructura que sirva de dissipador de energía, cuya función es salvar la diferencia $p = h_2 - h_3$, de forma que en el extremo inferior de la misma se consiga para las aguas el calado h_2 , conjugado del h_1 .

Los procedimientos seguidos para conseguirlo, varían según las diferencias existentes entre h_2 y h_3 .

Para diferencias pequeñas de p , entre h_2 y h_3 , se utiliza el denominado colchón de agua, que consiste en excavar aguas abajo del dique una profundidad $p + \Delta p$, de tal manera que Δp corresponda al aumento previsible de h_2 , al disminuir h_1 , como consecuencia del incremento de la altura de caída de la lámina, debido al descenso del fondo del cauce creado por la excavación.

Cuando se trata de diferencias grandes entre h_2 y h_3 , lo mejor es independizar la formación del calado h_2 al final del dissipador, del valor de h_3 , lo que se consigue mediante la creación de un obstáculo o contradique en la citada sección final, de manera que se establezca un calado tal sobre el contradique h_4 , que al verter nuevamente sobre el cauce del torrente se restablezca el valor h_3 , que corresponde a la circulación normal de la corriente. (figuras 29 y 30).

El Bureau of Reclamation (1982) establece como criterio para la adopción o no de los dissipadores de energía, el basado en el valor que adquiere el Número de Froude al pie del dique, en el supuesto que se trate de aguas limpias. Es decir:

$$F_1 = \frac{v_1}{(g \cdot h_1)^{\frac{1}{2}}} \quad (70)$$

- Cuando $F_1 < 1,7$ no es preciso realizar el dissipador de energía, bastando con un zampeado (recubrimiento de superficie con mampostería de piedra, tabique o concreto hidráulico, con el fin de protegerlas contra la erosión) de longitud $4h_2$ para la protección del lecho y seguridad de la obra.
- Si $1,7 < F_1 < 2,5$ el empleo del dissipador de energía es discrecional, y en cualquier caso su efecto es poco relevante.
- Si $2,5 < F_1 < 4,5$ se trata de una zona crítica en donde el resalto se estabiliza con dificultad. Si es posible, conviene evitar este intervalo, operando con las dimensiones del vertedero, a fin de modificar el régimen de descarga.
- Cuando $F_1 > 4,5$ se trata de valores para los que el empleo de los dissipadores de energía resulta adecuado.

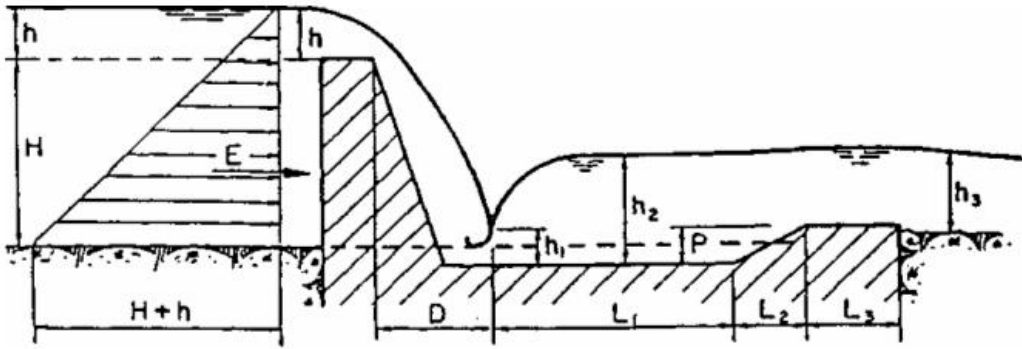


Figura 29. Cuenco amortiguador sumergido (caída libre).

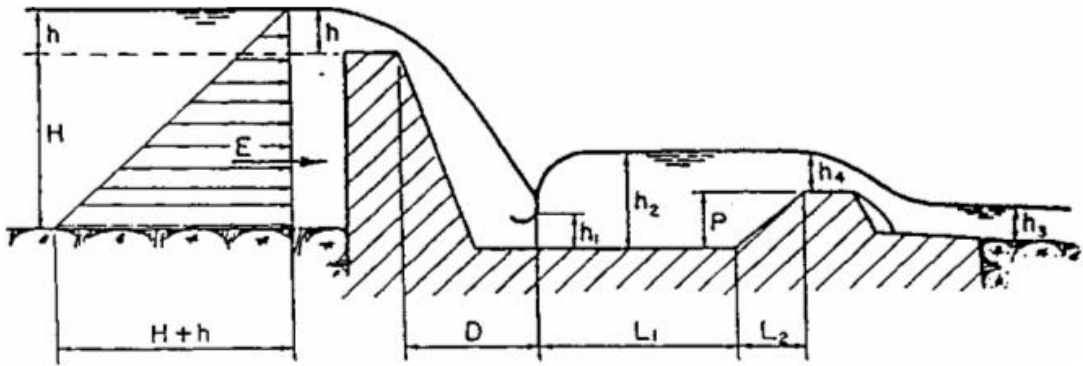


Figura 30. Cuenco amortiguador formado por un contradique, al pie de un dique (se supone caída libre).

Otros elementos de construcción y protección de los diques son los mechinales y los zampeados. Estos últimos consisten en evitar que las aguas que mantienen una velocidad superior a la de régimen en el tramo libre de aguas abajo de la obra, entren en contacto con el cauce natural del curso torrencial o cauce, mediante la interposición de una solera de materiales resistentes a la erosión. La longitud, D , del zampeado deberá ser como mínimo el del alcance de la lámina de vertido, que viene dado por la expresión número 60. Ahora, si se trata de torrentes con fuertes pendientes, es usual dotar al zampeado de una ligera pendiente en la misma dirección que el curso de agua. En estos casos su longitud, D , puede estimarse por la expresión:

$$D = f \cdot (H^{0,5}) \cdot h \quad (71)$$

Siendo, f un coeficiente que depende de la pendiente del zampeado, como los valores orientativos que se muestran en el cuadro 19.

Cuadro 19. Valores del coeficiente f , para estimar la longitud del zampeado.

Pendiente (%)	f
5	4,61
6	4,16
7	3,80
8	3,51
9	3,27
10	3,07
11	2,89
12	2,72
13	2,56
14	2,41
15	2,27

Cuando los efectos de la torrencialidad son importantes, los que mejor garantizan la defensa del dique son los disipadores de energía, que están basados en la capacidad de amortiguación (cuencos amortiguadores) de la cinemática de la corriente que presenta el resalto hidráulico. Asimismo, el cálculo de los cuencos amortiguadores involucra la determinación de diversos elementos, entre ellos:

- El caudal de cálculo: Este caudal Q debe corresponder a aquel valor de la gama de caudales desaguados por el cauce, que hace máxima la diferencia $h_2 - h_3$, lo que condiciona el uso de procedimientos iterativos.

No obstante, en la mayor parte de los cauces torrenciales, con regímenes normalmente rápidos en el tramo libre de aguas abajo, el caudal que hace máxima la diferencia $h_2 - h_3$, es el de cálculo de la lámina de vertido, que corresponde a la avenida máxima a desaguar, que se determina por cualquiera de los procedimientos hidrológicos y/o empíricos conocidos.

- El calado de régimen de la descarga en el tramo de aguas abajo; como lo normal es la inexistencia de aforos que permitan establecer una relación fiable, la determinación del calado h_3 exige el mapeo topográfico de la pendiente media del tramo y de las secciones transversales en el mismo, para aplicar posteriormente cualquiera de las fórmulas de circulación de los caudales en régimen uniforme en cauces abiertos.

Aunque se utiliza normalmente la fórmula de Manning, es recomendable el empleo de la fórmula de Strickler, con el coeficiente de rugosidad $K = 26 / (d_{go})^{1/6}$, siendo d_{go} el diámetro de los materiales del lecho; dato que es el utilizado por

Lombardi y Marquet (1950) en los canales de tramos erosionables realizados en el Pirineo francés (García, s/a).

- c. Los calados h_1 y h_2 : Se establece, tal como se indicó anteriormente, la ecuación de la conservación de la energía entre la sección de vertido del dique y la sección al pie del mismo. Así, h_1 se deduce de:

$$h_1^3 - \left(H + h + \frac{q^2}{2g \cdot h^2} \right) h_1^2 + \frac{q^2}{2g \cdot k^2} = 0 \quad (72)$$

En tanto, h_2 se determina a partir de la ecuación de los calados conjugados, resultantes de aplicar el Resalto Hidráulico, es decir:

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \cdot \left(\frac{h_1^2}{4} + \frac{2q^2}{g \cdot h_1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (73)$$

De donde se calcula h_2 , conjugado de h_1 .

- d. La profundidad p del cuenco: Una vez establecido por tanteos el valor de la diferencia $h_2 - h_3 = p$, éste será la que determina la profundidad que debe darse al cuenco («colchón hidráulico» que sirve para disipar la fuerza con la que ingresa el agua). No obstante, con el objetivo de asegurar la anegación suficiente de la lámina, es frecuente utilizar la expresión:

$$p = 1,15h_2 - h_3 \quad (74)$$

- e. El borde libre de los cajeros: Fijados p y h_2 , la altura de los cajeros de fábrica que enmarcan lateralmente, el cuenco h_5 se define por la ecuación.

$$h_5 = h_2 + 0,1(h_1 + h_2) \quad (75)$$

- f. La longitud de caída de la lámina de vertido: Se considera que la lámina sigue una trayectoria parabólica, tomando los ejes coordenados al pie del dique, en la vertical del borde del vertedero, donde el alcance D (m) viene dado por la ecuación:

$$D = \sqrt{2(H + p)h + h_2} \quad (76)$$

- g. Las longitudes L_1 , L_2 , L_3

L_1 (del fondo plano del cuenco): Resulta difícil evaluarlo teóricamente y es frecuente utilizar la expresión de Lindquist:

$$L_1 = 5(h_1 - h_2) \quad (77)$$

L_2 (de proyección de la contraescarpa): Considerando que la contraescarpa posee unos taludes comprendidos entre 2/1 y 4/1, y con el fin de facilitar la evacuación de los caudales sólidos, su longitud se estima que debe estar incluida en el intervalo:

$$2 p < L_2 < 4 p \quad (78)$$

L_3 , (de protección del cauce libre al final de la contraescarpa): Es una longitud variable según la calidad del terreno, y se protege con un zampeado o empedrado. Aparte de proteger la solera del cauce, en una zona de transición del régimen del cuenco al del cauce natural, sirve también de transición entre el coeficiente de rugosidad del cuenco y el del propio lecho del cauce. Según los casos puede establecerse esta magnitud en:

$$2,5 h_3 < L_3 < 3,5 h_3 \quad (79)$$

Caso práctico

Se quiere construir un dique de retención de sedimentos, de mampostería hidráulica, con una altura útil de 6 metros, tal que la cuña de sedimentos no sobrepase los 217 metros permitidos por la propiedad colindante.

El caudal de cálculo obtenido es de 61,2 m³/s y la pendiente media del entorno es del 4%.

Calcular las dimensiones mínimas de la obra vista, teniendo en cuenta: anchura media del vertedero, $b = 8$ m; coeficientes $C_h = 1,1$ y $C_e = 1,2$ en la altura y el espesor en coronación del vertedero respectivamente, así como unos pesos específicos $\gamma_s = 2.400$ Kg/m³ y $\gamma = 1.200$ Kg/m³, y un coeficiente de rozamiento fábrica-fábrica de 0,75. Asimismo, determine las mínimas dimensiones que hay que dotar a la cimentación de la estructura, para que satisfaga los condicionantes de cálculo en este tipo de obras, teniendo en cuenta el mismo coeficiente de rozamiento fábrica-fábrica anterior y una tensión de compresión admisible por el terreno de 3 Kg/cm².

Altura del vertedero (h):

$$h = \sqrt[3]{\frac{q^2}{b^2 \cdot g}} = \sqrt[3]{\frac{61,2^2}{8^2 \cdot 9,8}} = 1,8143$$

Se adopta

$$h \cdot 1,1 = 1,99 \approx 2,0 \text{ metros}$$

A este resultado se le suele multiplicar por un coeficiente de seguridad de 1,5, y de esta manera resulta, $c \cdot h_{cr} = 2,7214$. Para resolver este tipo de problemas de diseño, se suele adoptar un coeficiente intermedio. En este ejercicio se ha marcado de antemano un coeficiente, $c_h = 1,1$, con el objetivo de adoptar un valor más cercano al de construcción y, que por otra parte, permita desarrollar el ejercicio más fácilmente. Valor adoptado, $h = 2,0$ metros.

Espesor en coronación (e):

En este caso se recurre a la expresión,

$$e = \frac{\gamma \cdot h \cdot c}{\gamma_s \cdot f} = \frac{2 \cdot 1.200 \cdot 1,2}{2.400 \cdot 0,75} = 1,6 \text{ metros}$$

Como en el caso anterior, se adopta un coeficiente, $C_e = 1,2$; por lo que el resultado es 1,6 m

Espesor en la Base (B):

Para obtener este valor se establece la condición de núcleo central. Las fuerzas actuantes, son las siguientes:

$$P_0 = e \cdot h \cdot \gamma = 36.000$$

$$\beta(P_0) = \frac{(4aH + e)}{6}$$

$$S_p = \frac{(aH + e)(H + h) \cdot k \cdot \gamma_0}{2} = 7.200 (6a + 3,2)$$

$$E = H \cdot \left(\frac{H}{2} + h \right) \cdot \gamma = 10^3 (6a + 1,6)$$

Mientras que, los brazos de las fuerzas actuantes $\beta(F)$ son:

$$\beta(P_0) = \frac{(4aH + e)}{6} = 2,4$$

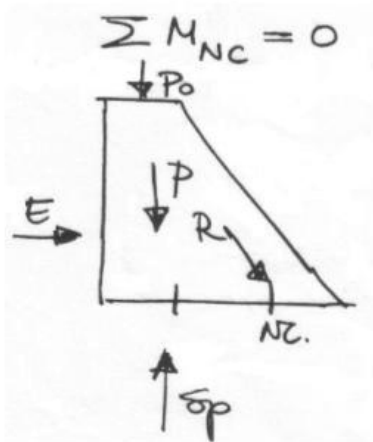
$$\beta(P) = \frac{(aH + e)^2 + e(aH + e) - e^2}{3(aH + 2e)} = \frac{(24a + 1,6)}{6}$$

$$\beta(S_p) = \frac{(aH + e)}{3} = \frac{36a^2 + 28,8a + 2,56}{3(6a + 3,2)}$$

$$\beta(E) = \frac{H(H + 3h)}{3(H + 2h)} = \frac{6a + 1,6}{6}$$

Luego, la condición de equilibrio estático,

$$-E\bar{X}(E) - S_p\bar{X}(S_p) + P_o\bar{X}(P_o) + P\bar{X}(P) = 0$$



Se obtiene una ecuación cuadrática, que en este caso es:

$$13,9 a^2 + 14,64 a - 15,016 = 0$$

Luego, $a = 0,6379 \approx 0,64$ y

$$B = aH + e = 0,64 \times 6 + 1,6 = 5,44 \text{ m}$$

Por lo tanto, se adopta, $B = 5,40$ m.

Figura 31. Análisis de fuerzas de un dique.

Donde,

NC : Núcleo central.

ΣM_{NC} : Sumatoria de los momentos del núcleo central.

Estabilidad al deslizamiento:

La segunda condicionante de cálculo de la obra vista, está dada por la siguiente expresión matemática:

$$\frac{\Sigma F_H}{\Sigma F_V} = \frac{E}{P + P_o + S_p} = \frac{36.000}{50.688 + 3.840 - 5.440} = 0,7334 < 0,75$$

Donde,

ΣF_H : Sumatoria de las fuerzas ejercidas en la obra, en el eje horizontal.

ΣF_V : Sumatoria de las fuerzas ejercidas en la obra, en el eje vertical.

S_p : Si el dique se apoya sobre una zapata sólida construida para tal fin, tiende a cero.

Luego, queda demostrado que la obra no se desliza en la junta con la cimentación.

Cimentación:

Alcance de la lámina vertiente, D:

$$D = \sqrt{2Hh + h^2} = 5,29 \approx 5,3\text{m}$$

Longitud de la cimentación:

$$L_c \geq D + e = 5,3 + 1,6 = 6,9\text{m}$$

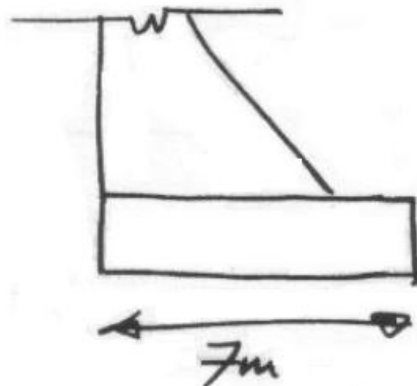


Figura 32. Longitud de la cimentación de un dique

Por tanto, $L_c \geq D + e = 5,3 + 1,6 = 6,9$, de donde se suele adoptar una cifra superior para impedir la socavación al pie de la obra. Para este ejercicio se ha adoptado, $L_c = 7$ metros.

Cálculo de los brazos del diagrama de la subpresión:

Para ello, se tienen en cuenta una serie de valores como:

- Primera fila de mechinales, $n = 1$ m.
- Altura de la cimentación, $h_c = 1$ m. (es la cifra con la que se comienza este tipo de cálculos, modificándose en casos concretos de mayor o menor profundidad de cimentación).
- Longitud de la cimentación, $L_c = 7$ m.

Con todos estos datos se obtienen: $l_a = 0,7692$ m. y $l_b = 0,2308$ m.

Excentricidad de la obra (Comprobación de la condición de vuelco):

Para ello, se calculan los momentos respecto al punto más profundo de la cimentación, aguas arriba de la estructura.

Algunas de las expresiones sufren una modificación, por lo que es interesante que se repasen los algoritmos.

Cuadro 20. Cálculo de fuerzas, brazos y momentos para un dique.

Fuerza	Brazo	Momento
$P_0 = 3.840$	$X(P_0) = 0,8$	3.072
$P_{11} = e \cdot H \cdot \gamma_s = 23.040$	$X(P_{11}) = 0,8$	18.432
$P_{12} = \frac{1}{2} (B - e) H \gamma_s = 27.360$	$X(P_{12}) = \frac{1}{3} (B - e) + e = 2,87$	78.432
$S_p = \left[\frac{1_a + 1_b}{2} \right] L_c \gamma_o k = 875$	$X(S_p) = \frac{L_c (21_b + 1_a)}{3(1_a + 1_b)} = 2,872$	-2.513
$E = H \left[\frac{H}{2} + h \right] \gamma = 36.000$	$X(E) = \frac{1}{3} (H + h) + h_c = 3,7$	132.000
$P_3 = L_c h_c \gamma_s$	$X(P_3) = \frac{L_c}{2} = 3,5$	58.800
	TOTAL	288.223

$$\Sigma F_H = 36.000 \text{ Kg} \quad m = \frac{\Sigma M}{\Sigma F_V} = 4,1078$$

$$\Sigma F_V = 70.165 \text{ Kg}$$

$$e^* = m - \frac{L_c}{2} = 4,1 - 3,5 = 0,60 < \frac{L_c}{6} = 1,17$$

Por consiguiente, esto asegura la inexistencia de tensiones de tracción.

Estabilidad al deslizamiento:

A continuación, se comprueba la condicionante de estabilidad al deslizamiento, pero a diferencia del cálculo realizado anteriormente en la obra vista, en este caso se hace intervenir a todas las fuerzas actuantes. Para ello, sirven las sumatorias de fuerzas determinadas en el punto anterior, de tal manera que:

$$\frac{\Sigma F_H}{\Sigma F_V} = \frac{36.000}{70.165} = 0,51 \leq 0,75$$

Como se puede apreciar, se cumple la condición de no deslizamiento para un coeficiente de $f = 0,75$ (fábrica-suelo). Hay que comprender que no siempre tienen que coincidir los coeficientes en las dos juntas, por lo que se recomienda que se seleccione el coeficiente, una vez observado el tipo de terreno en el emplazamiento de la obra.

Tensiones de compresión:

Este es el último condicionante de cálculo que ha de realizarse. Para ello, se establecen las fórmulas vistas anteriormente en este capítulo, que son las siguientes:

$$\sigma_{\text{MAX}} = \frac{\sum F_V}{L_c} \cdot \left(1 + \frac{6_e}{L_c}\right) = 15.178,5 \quad \text{Kg} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$\sigma_{\text{AMIN}} = \frac{\sum F_V}{L_c} \cdot \left(1 - \frac{6_e}{L_c}\right) = 4.868,6 \quad \text{Kg} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$\sigma_{\text{media}} = \frac{1}{4} (3\sigma_{\text{max}} + \sigma_{\text{min}}) = 12.600,7 \quad \text{Kg} \cdot \text{m}^{-2} = 1,26 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-2}$$

Como en el ejercicio la tensión admisible para el terreno es de 3 Kg/m², se cumple la condición de compresión.

Diques para la restauración Hidrológico-Forestal: La experiencia española.

En líneas generales, Europa no sabía de la problemática de la erosión hasta el siglo XIX. Hasta entonces la población, menos numerosa y, por tanto, con una presión apenas apreciable sobre el territorio, no era consciente del deterioro que, con el paso del tiempo, se iba produciendo como consecuencia de talas abusivas, roturaciones de áreas forestales por cambio de uso, explotaciones indiscriminadas, etc. Estos problemas en aquella sociedad no tenían el eco mediático que hoy supone un asunto de esta importancia medioambiental.

Por aquel entonces, los ingenieros restauradores de montañas se limitaron con sus medios a la conservación, la mejora y la repoblación de las laderas desprotegidas de vegetación, sobre todo en las cabeceras de las cuencas torrenciales, de las zonas montañosas de la Europa Central, y sobre todo, en los Alpes y los Pirineos.

En cuanto a los antecedentes históricos, se puede decir que en España la preocupación por la restauración forestal de muchas áreas de montaña, surgió, afortunadamente, en la misma época, por lo que hoy en día se pueden observar grandes logros de la Ingeniería de Montes en España, en zonas como los Pirineos y sus torrentes tipo alpino, donde se han venido desarrollando diferentes técnicas de corrección en cauces y laderas, entre los que cabe destacar las actuaciones en los ríos Aragón y Gállego en el Pirineo aragonés, así como las efectuadas en el río Noguera Pallaresa en Lleida, en el Pirineo catalán.

Ahora bien, la corrección de cauces torrenciales supone uno de los principales pilares en los que se basa la Restauración Hidrológico Forestal (R.H.F.). La sistemática de dicha corrección está orientada a disminuir, anular o, al menos controlar los procesos motivados por el geodinamismo torrencial en la cuenca vertiente donde se producen, evitando con ello, la incorporación de una importante tasa de materiales sólidos provenientes de las laderas de la cuenca, así como de los lechos y márgenes de la misma.

La corrección de cauces torrenciales tiene, por tanto, como objetivo principal, la regulación y control total o parcial de los efectos motivados por la dinámica del agua, tanto en la cuenca como en los propios álveos (o cauces) y terrenos marginales de las corrientes que drenan por la misma.

Con la adopción de medidas correctoras en los cauces se persigue, por una parte evitar la formación del caudal sólido y, por otra parte, si éste ya se ha producido, controlarlo, reduciendo al mínimo la tasa de depósito y sedimentación de los materiales que lo componen.

La ejecución de diques transversales al eje del torrente, ofrece la solución más simple y eficaz y ha sido una de las técnicas más utilizadas por la ingeniería de montes en la corrección de cauces torrenciales, tanto de la región pirenaica como de la cuenca mediterránea. Ambos casos, así como en otros repartidos por la geografía española, son hoy en día un fiel testigo de una labor de restauración que comenzó a principios del siglo XX y gracias a la cual, este tipo de actuaciones puntuales, unidas a las repoblaciones protectoras, auténtica labor de restauración, han permitido que actualmente se pueda disfrutar de lugares que de otra manera se hubieran perdido.

A continuación, se muestran algunas fotografías (30, 31, 32, 33 y 34) de la construcción y ubicación de diques de mampostería hidráulica, para la restauración hidrológico-forestal, en España.



Fotografía 30. Disposición de diques consecutivos para el control de torrentes



Fotografía 31. Corrección de torrentes



Fotografía 32. Construcción de diques
(Paramento inclinado aguas abajo)



Fotografía 33. Construcción de diques
(Paramento inclinado aguas arriba)



Fotografía 34. Diques con mechinales

Capítulo 5: Algunos estándares de construcción

En el marco de la evaluación técnica y económica de las obras de conservación de aguas y suelos construidas en el país, es prioritario conocer algunos estándares de construcción y recomendaciones que pueden resultar importantes, al momento de optimizar los recursos financieros de los propietarios agrícolas y/o forestales, interesados en la incorporación de estas técnicas bajo la obtención de las bonificaciones establecidas en la ley 19.561, para la recuperación y conservación de suelos degradados.

En este sentido, este manual incorpora los resultados obtenidos de las diversas experiencias de revisión, investigación y análisis de numerosos ensayos de recuperación de suelos a lo largo del país, particularmente, entre las regiones de Coquimbo y del Bío-Bío, y además, de los estándares obtenidos de los módulos experimentales del proyecto FDI - CORFO «Determinación de estándares en obras de ingeniería para la conservación y aprovechamiento de aguas y suelos para la mantención e incremento de la productividad silvícola», ejecutado por la sociedad EIAS Ltda.

Con ello, se ha logrado llevar a cabo una evaluación técnica, económica y productiva de las obras de conservación de aguas y suelos, con el propósito de establecer estándares de construcción y marcos de actuación adecuados para un desarrollo sustentable. Asimismo, estos elementos de decisión no son, en ningún caso, recetas para la aplicación inmediata, sin el previo análisis metodológico planteado en este libro, que involucra:

a) La revisión física de las obras, entendida como una óptima interceptación de las aguas lluvias y la no destrucción de aquellas

En términos hidrológicos, las zanjas de infiltración no deben ser sobrepasadas ni colapsadas por las aguas lluvias; para ello, se debe considerar un criterio conservador, o sea, incorporar un factor de seguridad en el diseño de éstas.

Cuadro 21. Recomendaciones para zanjas de infiltración

Periodo de retorno	Acorde al horizonte de planificación de la plantación forestal. Ejemplo: Plantación de pino = 20 años.
Intensidad máxima de precipitación en una hora	Uso de curvas IDF con series de datos pluviográficos completas y mayores a 15 años; de lo contrario, usar tablas de uso práctico y los parámetros K definidos en el capítulo 3, para extrapolar la intensidad de diseño a otras zonas aledañas.
Velocidad de infiltración	Según clase textural, trabajar con los valores mínimos de velocidad de infiltración.
Coefficiente de escorrentía	Trabajar con un valor alto (0,9), o bien, apoyarse del cuadro 15 (capítulo 3); coeficientes de escorrentía para ser usados en el método racional (Chow <i>et al</i> , 1994).

En términos técnicos de la construcción:

- 1° Se visualizan variaciones del diseño original de las zanjas en terreno, a causa de la irregularidad de éste y la necesidad de mantener el diseño con curvas de nivel.
- 2° Estas obras requieren de un corte biselado en la parte superior de la zanja de infiltración, con el fin de minimizar los efectos naturales de la erosión hídrica en terrenos con pendientes.
- 3° El camellón debe estabilizarse y no ser una fuente mayor de erosión, ni de sedimentación de las zanjas más abajo en la ladera.
- 4° Las obras requieren de operaciones anuales de mantención y limpieza, entendido esto como la remoción de tierra y la extracción de ramas u otros elementos ajenos a la zanja de infiltración.

En términos de la configuración geométrica de las zanjas de infiltración, los mejores resultados obtenidos en el Proyecto FDI- CORFO, son los siguientes:

- Base = 20 cm
- Altura = 30 cm
- Ancho = 30 cm
- Largo = entre 4 y 7 metros
- Taco = 30 cm (separación de las zanjas en una línea de construcción).

La construcción del canal de desviación de las aguas lluvias involucra un gran esfuerzo económico, por lo cual cada decisión, en cuanto a la configuración geométrica, el tipo de material revestido o no, y zonas de reforzamiento con sacos u otro material, resulta ser determinante al momento de invertir en una obra de conservación y aprovechamiento de aguas y suelos. En este sentido, el cuadro 22 describe algunas recomendaciones para el diseño hidrológico de un canal de este tipo.

Cuadro 22. Recomendaciones para canales de desviación

Radio Hidráulico	Maximizar el radio hidráulico ($RH = h/2$), con una sección transversal, donde h es la altura del canal.
Período de retorno	Acorde al horizonte de planificación para controlar la cárcava. Ejemplo, cárcava severa = 20 años.
Intensidad máxima de precipitación (en media hora)	Uso de curvas IDF con series de datos pluviográficos completas y mayores a 15 años; de lo contrario, usar tablas de uso práctico y Parámetros K para extrapolar la intensidad de diseño a zonas aledañas.
Pendiente del canal	Pendiente entre 0,5 y 5%. Recomendable superior a 1%, para evitar estancamiento.
Coefficiente de escorrentía	Coefficientes de escorrentía para ser usados en el método racional (Chow <i>et al</i> , 1994).
Zona evacuación	Reforzada con sacos de arena.

En términos técnicos de la construcción:

- 1º Es necesario caracterizar el material del canal, la pendiente de fondo, y la rugosidad de las paredes del mismo (tabla Horton, ver anexo V).
- 2º Cuando se hacen con pendientes mayores a 5%, deben revestirse con pastos, o protegerse con obras transversales (trinchos o barreras escalonadas).
- 3º Para evitar la entrada de agua a una cárcava que presente grave peligro de erosión, el canal debe localizarse a una distancia prudencial de la cabeza o extremo superior de ella, de manera que quede construido sobre terreno firme. Se recomienda que la estructura debe quedar a una distancia superior a tres veces la profundidad de la cárcava, o en su defecto a unos 3 metros (mínimo).

Cabe destacar que es necesario realizar a lo menos una vez al año la mantención y limpieza de la obra, debido a la natural sedimentación del material de arrastre en la ladera y a la indeseable caída de objetos ajenos a la obra, disminuyendo así la sección teórica diseñada.

b) La evaluación de desarrollo y crecimiento de las plantaciones, bajo distintos tratamientos establecidos en cada uno de los ensayos experimentales

En el marco de investigaciones del Proyecto EIAS, 5 ensayos experimentales fueron establecidos en marzo del año 2002, con una plantación de *Pinus radiata* (D.Don), asociada a la construcción de obras de conservación; zanjas de infiltración y unidades testigo, estas últimas, no presentan ningún tipo de tratamiento

de suelos. Las zanjas de infiltración estudiadas se establecieron en cada ensayo, en 2 modalidades, diferenciándose en la base de éstas, es decir, 20 y 30 cm., denominándose zanjas tipo 1 y zanjas tipo 2, respectivamente.

Zanjas tipo 1: base = 20 cm; altura = 30 cm

Zanjas tipo 2: base = 30 cm; altura = 30 cm

El propósito de este estudio fue determinar qué tipo de zanja es más eficiente en la captación de aguas lluvias, así también, relacionar los distintos distanciamientos entre zanjas para cada situación edafoclimática particular y su influencia en el desarrollo y crecimiento de las plantas de *Pinus radiata* (D. Don), mediante la medición de la altura y el diámetro de cuello de las mismas.

Para determinar el grado de efectividad para cada una de las obras establecidas, se realizó un muestreo de crecimiento y sobrevivencia correspondiente al 30% de la plantación, a 1 año de dicho establecimiento (marzo 2003), en cada uno de los ensayos. Así también, se caracterizaron los resultados con medidas que indican el valor alrededor del cual se agrupan los datos (tendencia central), y medidas que hagan referencia a la variabilidad que refleje dicha fluctuación (dispersión de los datos). Para esto, se muestra un resumen de estos valores, obtenidos del programa Statgraphics para windows, para uno cada de los tratamientos: Zanjas tipo 1 y 2 y el Testigo. El cuadro 23, presenta los promedios de crecimiento en altura (en centímetros) y los promedios del desarrollo radicular (en milímetros) para cada uno de los tratamientos estudiados, remarcando con **negrita**, el tratamiento de mayor crecimiento en ambas variables, diámetro de cuello y altura de las plantas.

Cuadro 23. Evaluación del crecimiento de las plantaciones de *Pinus radiata* (D.Don)

ENSAYO	Testigo	Zanjas 1	Zanjas 2
HIDANGO (VI Región)			
Altura promedio (cm)	39,8	43,3	43,6
Diámetro promedio (mm)	8,8	7,6	8,0
Prendimiento (%)	86,5	88,9	87,2
NAME (VII Región)			
Altura promedio (cm)	49,4	62,2	59,7
Diámetro promedio (mm)	9,0	11,6	10,5
Prendimiento (%)	82,5	100,0	92,5
PARRÓN (VII Región)			
Altura promedio (cm)	48,8	43,1	39,8
Diámetro promedio (mm)	10,9	9,2	8,3
Prendimiento (%)	95,3	100,0	100,0
MANZANARES (VIII Región)			
Altura promedio (cm)	49,4	47,8	54,1
Diámetro promedio (mm)	10,3	10,4	11,3
Prendimiento (%)	95,0	88,6	100,0
LLOHUÉ (VIII Región)			
Altura promedio (cm)	50,2	53,8	51,8
Diámetro promedio (mm)	11,2	12,4	11,0
Prendimiento (%)	84,8	88,6	81,8

(*) Medición realizada al año del establecimiento

¿Existe alguna diferencia en usar algún tratamiento en particular?

Los resultados obtenidos de los muestreos realizados a las plantaciones de pino del proyecto, se contrastaron con un test estadístico no-paramétrico (**Kruskal-Wallis**), para discriminar la presencia de diferencias significativas en los tratamientos. De esta forma, fue posible detectar que en todos los casos analizados (valor p es menor a 0,05, cuadro 24), hay evidencias de que existen diferencias significativas entre los tratamientos estudiados (zanjas y la unidad testigo), excepto en el ensayo Hidango, perteneciente al Centro Experimental INIA - Litueche, VI Región, donde la explicación se fundamenta en la



Fotografía 36. Vista del Ensayo Name, VII Región

gran cantidad de malezas de las zanjas, con lo cual las plantas compiten por nutrientes, agua y el espacio radicular, influyendo en el crecimiento de las mismas. Sin embargo, en la mayoría de los demás ensayos es posible inferir que las obras de conservación aplicadas constituyen un efecto positivo en el crecimiento de las plantas.



Fotografía 35. Día de campo con pequeños propietarios en ensayo Name, VII Región

Cuadro 24. Test de Kruskal-Wallis

Ensayo	P- Value	Prueba hipótesis
Hidango	0,28710	No existen diferencias significativas
Name	3,66574E-8	Existen diferencias significativas
Parrón	0,00235	Existen diferencias significativas
Llohué	0,29395	Existen diferencias significativas
Manzanares	0,00010	Existen diferencias significativas

En aquellas situaciones en las que se haya rechazado la hipótesis acerca de la igualdad de las distribuciones poblacionales de las cuales hayan sido extraídas las muestras (casos Name, Parrón, Llohué y Manzanares), será necesario, igual que en el caso del ANOVA, realizar contrastes a posteriori que determinen o precisen entre qué muestras existen las diferencias significativas que provocan el rechazar la hipótesis nula del contraste de Kruskal-Wallis. Así, se tendrá elementos básicos para decidir qué técnica de conservación es la más eficiente para la planta.

Para ello, se utiliza el test **U de Mann-Whitney**, que es una prueba estadística no paramétrica de comparación de medianas, para cada una de las combinaciones posibles de los tratamientos presentes en cada ensayo, la cual da como resultado el tratamiento que tiene un mejor efecto en las variables de crecimiento, a saber, diámetro de cuello y altura.

Los resultados fueron categóricos en indicar, que la totalidad de las pruebas de hipótesis se rechazan (no se acepta H_0), o sea, provienen de poblaciones distintas. Para ello, se recomienda rescatar el tratamiento con mayor valor de crecimiento. En este contexto, y de acuerdo al cuadro 26, los sectores con plantas de *Pinus radiata* (D.Don) habilitados con zanjas de tipo 1 (base = 20 cm, ancho = 30 cm, altura = 20 cm), resultan con una mayor productividad silvícola.

De los 5 ensayos estudiados, sólo en un caso en particular la unidad testigo superó a los demás tratamientos. Dicha diferencia responde a una situación específica del lugar de estudio, como por ejemplo; texturas y calidades nutricionales disímiles, o bien, el suelo del testigo no fue removido antes de la plantación, a diferencia de los otros tratamientos, donde la construcción de las obras removió altamente el suelo, perdiendo de esta manera el equilibrio que presentaba desde el momento que había sido talado. Asimismo, es interesante mencionar que las dos zonas evaluadas presentan una gran cantidad de malezas, lo que contribuye a una alta competencia de agua, luz y nutrientes, para las plantas que se encuentran en pleno crecimiento.

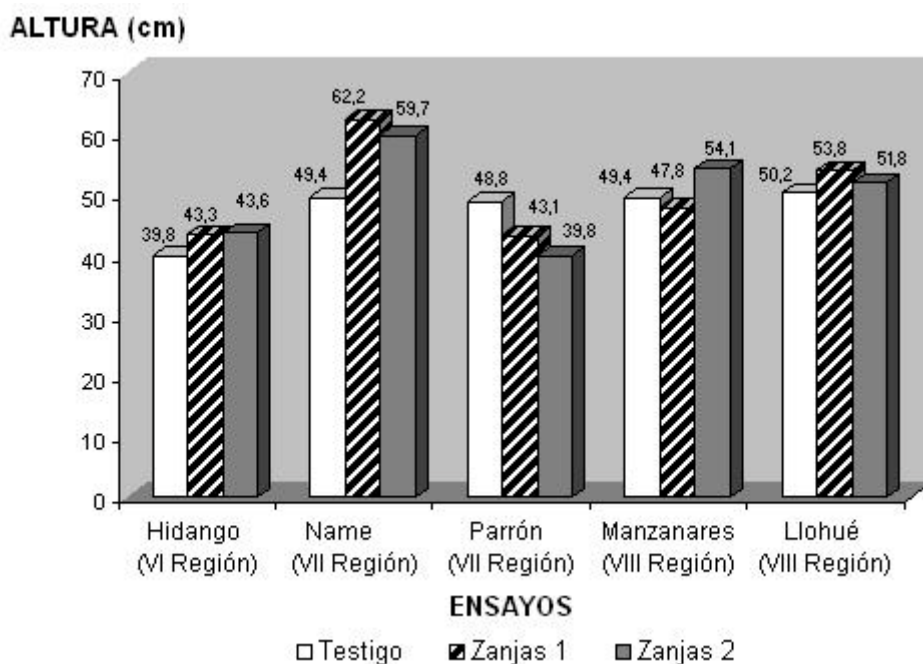


Gráfico 6. Muestreo de plantas de 1 año (marzo 2002 - marzo 2003)

Al comparar los crecimientos en altura (gráfico 6) para cada uno de los ensayos, es posible detectar una superioridad de las técnicas de conservación y aprovechamiento de aguas y suelos, con respecto a la zona testigo. Así, las plantas de sectores con zanjas de infiltración, responden de mejor forma y con mayores crecimientos promedio.

Finalmente, se hace necesario complementar la información de desarrollo y crecimiento de las plantas de *Pinus radiata* (D.Don), con el nivel de prendimiento de ellas. Para esto, se determinó que la sobrevivencia promedio de cada uno de los tratamientos, supera el 85% (cuadro 25). Los tratamientos testigo y zanjas tipo 2, son los que obtuvieron los menores porcentajes de sobrevivencia. Por otro lado, zanjas tipo 1, obtuvo los más altos porcentajes de sobrevivencia.

Cuadro 25. Sobrevivencia promedio de los tratamientos

Ensayo	Tratamientos	Sobrevivencia (%)	Promedio (%)
Zanjas tipo 1	Name	98	91
	Parrón	97	
	Llohué	89	
	Hidango	86	
	Manzanares	86	
Zanjas tipo 2	Parrón	100	85
	Manzanares	98	
	Name	85	
	Hidango	80	
	Llohué	75	
Testigo	Parrón	97	85
	Hidango	90	
	La Rosa	85	
	Name	81	
	Llohué	79	
	Manzanares	76	

En resumen, es posible evidenciar que en la fase inicial de establecimiento y crecimiento de las plantas de *Pinus radiata* (D.Don), en el período 2002 - 2003, la construcción de obras de conservación y aprovechamiento de aguas y suelos mejora notablemente los valores de productividad silvícola en 5 sectores del secano costero e interior de Chile Central. Asimismo, al definir y diseñar experimentalmente diversas condiciones edafológicas e hidrológicas, los resultados revelan, en todos los casos, marcadas diferencias en el desarrollo y crecimiento a favor de las zanjas de infiltración tipo 1 (base = 20 cm, ancho = 30 cm, alto = 20 cm).

c) La evaluación técnico - económica de las zanjas de infiltración y canal de desviación de aguas lluvias

Para el caso de las zanjas de infiltración implementadas por el proyecto EIAS, se tiene que existen diferencias importantes en términos de costos, dependiendo del lugar en donde se realizaron las obras, como se observa en el cuadro 26.

Cuadro 26. Costo por m³ construido de zanjas de infiltración

PREDIO	Costo \$/m ³
Pumanque	1.428
Hidango	1.104
Name	2.140
Parrón	2.993
Botacura	4.489
Llohué	10.594
Manzanares	5.710
PROMEDIO	4.065
Desviación	3.318

Cabe señalar que el rango de costos es muy alto, por el hecho de que los sitios no presentan similares características de suelo, pendiente, vegetación o desechos al momento de la construcción de las obras. Sin embargo, pese a esto se observa que el costo en todas las situaciones es menor que a lo establecido por CONAF en su tabla de costos del año 2003, donde el valor promedio de construcción de zanjas de infiltración, obtenido de datos in situ es de, **4.065** \$/m³, el cual es casi 7 veces menor que el costo bonificable por CONAF, **29.125** \$/m³, y aproximadamente 3 veces menor que la situación más desfavorable para la construcción de zanjas, la que ocurre en el predio Llohué, donde el terreno presenta grandes cantidades de piedras y restos de la explotación forestal (tocones), provocando que los rendimientos de construcción bajaran ostensiblemente y el costo por metro cúbico de zanjas de infiltración alcanzó un valor de 10.594 \$/m³.

Para el caso de los canales de desviación, las diferencias observadas en los dos predios en estudio son mínimas en términos de costo, alcanzando un valor promedio de **7.898,9** \$/m³, contrarrestado con los **27.225** \$/m³ asumidos según la tabla de costos de CONAF, para el año 2004.

En este marco, el diseño hidrológico de zanjas de infiltración que se plantea en el proyecto EIAS, considera un diseño espacial más complejo, por lo que se hace necesario y relevante determinar los costos por superficie, particularmente por hectárea, enmarcados en las opciones que actualmente entrega la legislación vigente.

Aquí nace una interrogante fundamental, en términos de lograr el máximo beneficio ambiental y productivo: ¿Qué es lo más apropiado? Mejorar los procesos de infiltración de agua en el suelo, construyendo una cierta cantidad de zanjas distribuidas homogéneamente, o bien, capturar eficientemente el agua lluvia, construyendo un número óptimo de zanjas para el aprovechamiento total de este recurso.

Capítulo 6: Otras obras de conservación y aprovechamiento de aguas y suelos

Los métodos de conservación de aguas y suelos son múltiples y podría decirse que cada uno de ellos se acomoda a cada caso en particular. Sin embargo, se pueden establecer algunas divisiones que responden muy bien a la forma de llevarlos a cabo y las técnicas empleadas, a saber, métodos biológicos y métodos mecánicos de conservación y aprovechamiento de aguas lluvias y suelos degradados (Peralta, 1976).

Entre las medidas mecánicas de conservación, los diques en quebradas, las empalizadas, los muretes y las terrazas en laderas, gozan de gran popularidad, pero su alto costo de construcción impide su masificación e incorporación en las forestaciones a gran escala. Estas obras retienen el agua o la desvían hacia canales de menor gradiente o mayor sección transversal, y de esta forma reducen la potencia de corte y arrastre de la escorrentía superficial y aumentan la infiltración. Son de especial utilidad en las zonas de cuencas, donde el volumen de escorrentía ha aumentado radicalmente debido a los cambios en el uso de la tierra.

El efecto de las obras mecánicas puede ser de breve duración, a menos que se adopten medidas para conseguir la reducción de la causa primordial de la erosión, que es la exposición a las gotas de lluvia (Harcharik y Kuncle, 1978).

Para un control efectivo contra la erosión hay que complementar las plantaciones forestales con obras de conservación, especialmente en la fase de establecimiento. Cualquier práctica que promueva el manejo de vegetación permanente, en sentido contrario a la pendiente, ayudará a reducir el escurrimiento, a captar sedimentos y a aumentar la infiltración del agua en el suelo, reduciendo la erosión causada por la acción de la lluvia o el riego (Carlson, 1990).

En este contexto, el presente capítulo describe de forma detallada las siguientes obras de conservación y aprovechamiento de aguas y suelos;

Medidas mecánicas

- Gaviones
- Muretes
- Empalizadas
- Fajinas
- Microterrazas
- Subsulado

Medidas biológicas

- Biotecnias

En primer lugar los **gaviones** son obras de mampostería para la estabilización y protección de cursos de agua secundarios (fotografía 37), generalmente temporales, tales como arroyos, esteros, quebradas y de cárcavas y contención de taludes.



Fotografía 37. Gaviones (V Región)

Esta estructura se sustenta por su propio peso y actúa por resistencia mecánica. Consiste en un conjunto de paralelepípedos fabricados con malla hexagonal en alambre de acero galvanizado y relleno con piedras. La altura, largo y ancho de la obra se calculará según las condiciones del terreno y el tipo de relleno del gavión.

En segundo lugar, y a diferencia de los diques, la construcción de **muretes** (fotografía 38) no presenta vertedero. Éstos se deben ubicar perpendicularmente al eje hidráulico, contribuyendo así, a disminuir el transporte de material erosionado. Pueden ser hechos de diferentes materiales, como mampostería en seco, polines, de sacos rellenos con tierra o con neumáticos.



Fotografía 38. Muretes de contención de sedimentos
(murete de piedras, IV Región; murete con neumáticos, VIII Región; murete de sacos, VIII Región)



Fotografía 39. Empalizadas (VII Región)

En tercer lugar, las **empalizadas** (fotografía 39) son obras de regulación de flujos hídricos y de contención de sedimentos en taludes, cárcavas y laderas inestables. Éstas últimas se diferencian de los diques de polines, en que no presentan vertedero.

Generalmente, presentan una altura entre 0,25 y 0,8 metros y un largo variable. La cantidad de empalizadas y el espaciamiento entre líneas de éstas, dependerá del estado de degradación e inclinación del terreno

En cuarto lugar, la incorporación de **fajinas** en predios agrícolas y/o forestales permite detener los procesos erosivos, especialmente en laderas descubiertas de vegetación (fotografía 40). Esta técnica consiste en colocar perpendicularmente a la pendiente del eje hidráulico ramillas de 10 a 40 cm de diámetro, atadas con alambre, y reforzadas con un malla.



Fotografía 40. Fajinas en ladera (VIII Región)

Asimismo, se pueden utilizar para la regeneración de vegetación, por lo que se colocan en la orilla del cauce, de tal forma que las partes que deben enraizar estén fuera del agua y en contacto con el suelo, las que se cubren con tierra (López Cadenas, 1994).

En quinto lugar, las **microterrazas** (fotografía 41) son una plataforma formada artificialmente, que interrumpe la pendiente del terreno, permitiendo al mismo tiempo, que en estas plataformas se cultive o se planten especies forestales.



Fotografía 41. Construcción de microterrazas (VII Región)

Su finalidad es mejorar la infiltración, y con ello, la defensa del suelo contra la erosión hídrica, provocada por la lámina de escurrido.

Su construcción puede ser realizada en forma manual o escarificada (mecanizada con remoción superficial del suelo, y previo subsolado del suelo). Ver fotografía 42.



Fotografía 42. Funcionamiento de la microterrazza asociada a una plantación (VII Región)

El ancho de la terraza está determinado tanto por la naturaleza del suelo y su profundidad, como por la pendiente del terreno, mientras que, el largo de las microterrazas es variable, con una disposición continua o discontinua.

La plantación se debe establecer sobre la terraza, cuando el suelo sea profundo, o sobre el camellón cuando el suelo sea delgado o superficial.

Finalmente, una de las medidas de laboreo que favorece la capacidad de infiltración, la resistencia al arrastre de partículas y la fertilidad del suelo, es el **subsolado** (fotografía 43), siempre que se aplique adecuada y oportunamente. Este subsolado consiste en producir cortes perpendiculares en el suelo, de una profundidad de 40 a 60 cm, dados generalmente en curvas de nivel, que no alteran el orden de los horizontes, mediante un apero denominado subsolador o ripper. El subsolado se debe realizar cuando el terreno esté lo más seco posible, con el fin que el agrietamiento y mullido del suelo sea efectivo. (López Cadenas, 1994).



Fotografía 43. Faena de subsolado a 5 metros de espaciamiento entre líneas. (Manzanares, VIII Región)

Por otra parte, existe una variedad de prácticas o medidas biológicas para la conservación y aprovechamiento de aguas y suelos, como por ejemplo cultivos en contorno o en fajas, establecimiento de pastizales y plantación de especies arbóreas, entre otras.

El uso de las **biotecnias** o trabajo biológico con especies herbáceas y leñosas-arbustivas recuperadoras y estabilizadoras de suelos degradados, cumplen un rol complementario a los trabajos físico mecánicos de obras de recuperación de suelos degradados y su aplicación se justifica en áreas específicas como taludes, cárcavas, márgenes de cauces secundarios y en aquellas áreas con obras de recuperación de suelos que lo requieran, tales como camellones, terraplenes, sacos y rellenos. Se entenderá estabilizada la superficie tratada cuando se alcance al menos un 60% de cobertura vegetal homogéneamente distribuida (www.conaf.cl).

En general, el establecimiento de una cubierta forestal bien manejada constituye de por sí, más que cualquiera otro método, el sistema más eficaz de conservación de suelos y aguas.

Así, el establecimiento de un bosque será la medida de mayor protección al suelo, lo que desarrollará su propia capacidad de conservación. En las tierras de pendientes escarpadas y suelo erosionable, puede ser necesario a veces los trabajos de orden físico, para controlar la erosión, en la fase de afianzamiento de una repoblación forestal (Gil, 1986).

Consideraciones Finales

Incorporación de obras de conservación y aprovechamiento de aguas y suelos

La implementación de obras hidrológico-forestales, que mejoren la relación agua-suelo-planta, posibilitará que muchos propietarios de terrenos que hoy son usados con cultivos de baja rentabilidad, o bien, simplemente no son utilizados, puedan ingresar a la actividad forestal.

Los resultados observados en las distintas experiencias en el país, indican los efectos positivos que tienen las prácticas de conservación de aguas y suelos al conseguir mejoras significativas en las variables del sitio.

En el estudio realizado por Pizarro y Saavedra en el año 1999, se hace un análisis comparativo de una plantación de *Pinus radiata* (D.Don) de un año en el sector de Llongocura (VII Región), con zanjas de infiltración. Los resultados revelaron una mayor humedad del suelo, (42% superior que el sector testigo) y una mayor altura de las plantas (34% mayor que el testigo). El subsolado por su parte registró mayores valores de humedad del suelo (37% mayor que el testigo) y también de crecimiento (un 28% mayor que el sector testigo). En cuanto a la sobrevivencia de las plantas, para las parcelas donde se aplicaron las zanjas de infiltración fue de un 77%, y donde se aplicó el subsolado la sobrevivencia alcanzó un valor de 79%, en tanto en las parcelas testigo, la sobrevivencia fue de 70%.

Para el caso de una plantación de *Pinus radiata* (D.Don) de siete años de edad en el mismo sector de Llongocura (VII Región), se registraron notorios incrementos en el crecimiento diametral y en altura, comparados con una plantación del mismo sector y de la misma edad, en la cual no se realizó ningún tratamiento (cuadro 27). El volumen alcanzó un valor casi cuatro veces mayor en el sector con zanjas de infiltración.

Cuadro 27. Resultado del Test de Duncan en la medición de la altura, con un 99% de confianza

Tratamientos	Media	Diferencias entre sí		
	(cm)	Comparación	Diferencia (cm)	Resultado
Zanjas	57,0	Zanjas - Subsulado	2,4	No existen diferencias
Subsulado	54,6	Zanjas - Testigo	14,4	Existen diferencias
Testigo	42,5	Subsulado - Testigo	12,1	Existen diferencias

Con este estudio se puede afirmar que las técnicas de conservación de aguas y suelos, favorecen el establecimiento y crecimiento de las plantaciones forestales de *Pinus radiata* (D.Don) en las zonas semiáridas del secano costero de la VII Región, debido a la alta eficiencia en la captura de humedad, lo que conlleva a

obtener crecimientos más rápidos y sostenidos en lugares en los cuales, por la degradación que ha sufrido el suelo por condiciones de sequía, lo más probable es que jamás se esperarían estos resultados (fotografía 44).



Fotografía 44. Plantación de *Pinus radiata* (D.Don) con zanjas de infiltración (7 años) (Llongocura, VII Región)

Luego, este estudio refleja la importancia de la aplicación de técnicas de conservación y aprovechamiento de aguas y suelos en el establecimiento de plantaciones forestales y en su respectivo crecimiento, lo que se traduce en el aumento de la productividad de la plantación.

Por otra parte, los canales de desviación de aguas lluvias deben ser apreciados como estructuras para evacuar volúmenes significativos de agua y poseen un costo relativamente alto.

Como elemento adicional, estas estructuras son más efectivas cuando sirven en áreas que estén cubiertas de bosques o de pastos, pues en tales condiciones no ocurren sedimentaciones de importancia, que son la causa más frecuente de su fracaso. Asimismo, éstas se deben construir con pendientes que fluctúan entre 0,5 y 5 % (máximo). Cuando se hacen con pendientes mayores, deben revestirse con pastos, o protegerse con obras transversales (<http://www.angelfire.com/ia2/ingenieriaagricola/canales.htm>).

La metodología planteada corresponde a una de tipo práctico con base teórica que permite solventar los requerimientos básicos de diseño en canales trapeziales. En este sentido, al considerar un diseño de canales rectangular, éste obedece a elementos matemáticos que poseen similar asidero técnico que la sección transversal, por lo cual es posible realizar otras derivaciones si ello fuese necesario.

Nuevas proyecciones y desafíos

Si bien es cierto que el Gobierno de Chile ha implementado varias medidas de control y fomento para mitigar y/o revertir la situación de degradación de los suelos productivos y la no utilización del agua de escorrentía, éstas son de carácter general (a nivel nacional), asumidas por diferentes instituciones que a menudo desarrollan sus acciones en forma independiente unas de otras.

No obstante lo anterior, el Estado, considerando la importancia y magnitud de la desertificación, cuenta con varios instrumentos y disposiciones legales que, a través de sus organismos como son el Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP), la Corporación Nacional Forestal (CONAF), el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), la Comisión Nacional de Riego (CNR), la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), el Fondo de Solidaridad e Inversión Social (FOSIS), el Ministerio de Agricultura, el Ministerio de Obras Públicas y los Gobiernos Regionales, aplica para contribuir al control o mitigación de los efectos de la desertificación y a una de sus principales consecuencias: la erosión. Sin embargo, el ataque de este flagelo ha sido más bien desde una perspectiva ecológica que productiva y con una importante carencia en la ingeniería hidrológica de diseño y construcción.

Asimismo, la inexistencia de una adecuada conciencia ambiental entre los usuarios y que no se cuenta con una gestión ambientalmente sustentable para un manejo eficiente e integrado de los recursos agua y suelo, no permite aprovechar las todavía importantes oportunidades de negocios que se generan; pero, aún más grave es la posible pérdida de mercados cada vez más exigentes, debido a las demandas ambientales que han acarreado los tratados comerciales firmados últimamente con Estados Unidos, la Unión Europea y Corea del Sur.

Por otra parte, el negocio al que las empresas forestales pueden acceder, está relacionado directamente con la incorporación de esta tecnología de diseño hidrológico en sus labores de plantación, con lo cual se conseguiría una mayor competitividad económica de las empresas, por efecto del aumento en el volumen de madera por hectárea al final de la rotación de las plantaciones, y con ello, lograr obtener una mejora en la productividad del sitio forestal.

Otro aspecto importante, es el desarrollo de una línea de capacitación y la transferencia tecnológica, en particular, por parte de los operadores forestales a los pequeños propietarios, incorporando obras de conservación de aguas y suelos en la forestación de terrenos acogidos a los beneficios de la ley 19.561, generando un polo de trabajo para Ingenieros Forestales, Agrónomos y profesionales afines con especialidad en la corrección de fenómenos erosivos y el aprovechamiento hídrico; asimismo, abre las ventanas para que instituciones de educación superior desarrollen líneas de investigación y la capacitación profesional en el campo de la hidrología forestal, la conservación de suelos y el manejo sustentable de cuencas hidrográficas.

Sin embargo, dicha temática, poco estudiada en nuestro país, impone arduos desafíos necesarios para un desarrollo paulatino en el conocimiento y aplicación de estas obras.

En este sentido, establecer un programa de postgrado relacionado con la gestión ambiental de los recursos agua y suelos, con especialidad en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas, resulta ser fundamental al momento de generar profesionales de alto nivel, necesarios en las instituciones vinculadas y responsables de la ejecución de planes y programas, como así también, en la formulación de políticas estatales de actuación en el fomento forestal y la recuperación de suelos degradados de nuestro país.

Asimismo, impone desafíos para afianzar los lazos entre la actividad pública y privada, además de otros organismos de investigación y/o centros tecnológicos, permitiendo de esta manera insertarse en la realidad de su entorno con propuestas concretas, que satisfagan las necesidades de los diversos agentes productivos regionales.

Frente a ello, el impacto económico y las ventajas competitivas generadas con la incorporación de la ingeniería hidrológica están asociados a las mejoras de los niveles de competitividad agroindustrial y forestal que permitan cumplir con los estándares internacionales del manejo ambiental de los recursos agua y suelo y a la incorporación no sólo de suelos de alta productividad sino también suelos degradados o erosionados, que sin duda posibilitarán mantener y/o aumentar el mercado exportador del sector silvoagrícola, debido a que la implementación de buenas prácticas agrícolas y forestales, estaría generando las condiciones para un mejor cumplimiento de las normas exigidas por los países importadores de productos chilenos.

Por ello, el sector silvoagrícola de la zona central de Chile debe incorporar los elementos de la ingeniería hidrológica para lograr y alcanzar un mejoramiento real de los índices de productividad del sitio (agua y suelo). Así, los conocimientos I+D+I y la innovación tecnológica aplicada directamente a la empresa vitivinícola, frutícola, olivícola, forestal, etc, permitirán alcanzar una nueva fase de desarrollo y crecimiento para el país, y parte de ello, es la integración y el acercamiento entre los núcleos científicos de las universidades y el mundo silvoagrícola privado, que logren potenciar los esfuerzos, generándose en ciertos casos tales niveles entrópicos, que las unidades productivas desconocen el potencial económico que les pueden ofertar los núcleos de investigación.

Así, surge como elemento deseable el incrementar un uso eficiente del agua y del suelo, que genere por una parte un proceso sustentable para que los nuevos mercados, nacionales e internacionales, se mantengan o incrementen, generando nuevos negocios, empleos y divisas; y por otra, se asegure la sustentabilidad ambiental de los procesos productivos.

Referencias Bibliográficas

Aparicio, F. 1997. Fundamentos de hidrología de superficie. Balderas, México: Limusa. 303 p.

Aros, V. 1997. Apuntes de hidrología. Ingeniería Civil. Universidad de Concepción. Concepción. Chile. 25 - 31 p.

Bureau of Reclamation. 1982. Diseño de presas pequeñas. 11ª reimpresión. Editorial CECSA. México. 639 p.

Carlson, P. 1990. Establecimiento y manejo de prácticas agroforestales en la sierra ecuatoriana. Editorial Cormen. Quito, Ecuador. pp. 24 - 111.

Chen, C. 1983. Rainfall intensity-duration-frequency formulas. Journal Hydraulic Engineering. 109(12): 1603-1621 p.

Chow, V.; Maidment, D.; Mays, L. 1994. Hidrología aplicada. Primera edición. Editorial Mc Graw-Hill. Santa Fé de Bogotá, Colombia. 584 p.

Ciancaglini, N. 1986. Canales de conducción del agua. Manual de uso y conservación del agua en zonas rurales de América Latina y el Caribe. Tomo II (Borrador). Proyecto Regional Mayor de UNESCO-ROSTLAC, Montevideo, Uruguay, p.i.

Cid, L.; Mora, C.; Valenzuela, M. 1990. Estadística matemática. Probabilidades e inferencia estadística. Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias. Departamento de Matemáticas. Concepción. Chile. 319 p.

Critchley, W.; Siegert, K. 1996. Manual de captación y aprovechamiento del agua de lluvia, Tomo I: Bases técnicas y experiencias en África y Asia. Oficina Regional de la FAO para América latina y El Caribe. Chile.

Donoso, C. 1994. Ecología Forestal. Editorial Universitaria S.A. Santiago. Chile. 369 p.

Francke, S. 2003. Experiencias de manejo integral de cuencas hidrográficas con énfasis en conservación de aguas y suelos. En Seminario Internacional. Santiago, Chile. 20-21 noviembre del 2003. 64 p.

García, J. s/a. Manual de cálculo de diques de corrección torrencial. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes (E.T.S.I.M.). Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. España. 68 p.

Gil, N. 1986. Desarrollo de cuencas hidrográficas y conservación de suelos y aguas. Roma FAO. Boletín de suelos N° 44. pp. 87-89.

Gujarati, D. 1992. *Econometría*. Segunda edición. Mc Graw-Hill Latinoamericana. D. F. México. 597 p.

Gurovich, L. 1985. *Fundamentos y diseño de sistema de riego*. Instituto Interamericano de cooperación para la agricultura (CIIA). Primera Edición, San José, Costa Rica. Capítulo 6. p. 143-168.

Harcharik, D.; Kuncle, S. 1978. *Plantaciones forestales para la rehabilitación de tierras erosionadas*. Roma FAO. Italia. Guía conservación N° 4. pp. 87-97.

Heras, R. s/a. *Recursos hidráulicos. Síntesis, metodología y normas*. Cooperativa de Publicaciones del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. España, 361 p.

López Cadenas, F. (Coordinador). (1994). *Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión*. Editorial Mundi Prensa y Tragsa. Madrid. 902 p.

Peralta, M. 1976. *Uso, clasificación y conservación de suelos*. Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). Gobierno de Chile. Santiago. Chile. s/p.

Pizarro, R.; Novoa, P. 1986. *Instructivo n° 5. Determinación de valores probabilísticos para variables hidrológicas*. Elementos técnicos de Hidrología. Corporación Nacional Forestal (CONAF). Chile. 78 p.

Pizarro, R. 1988. *Elementos técnicos de hidrología II: Proyecto regional sobre uso y conservación de recursos hídricos en áreas rurales de América Latina y el Caribe*. Conaf. IV Región. Chile. 109 p.

Pizarro, R. 1993. *Elementos técnicos de hidrología III. Proyecto regional mayor sobre uso y conservación de recursos hídricos en áreas rurales de América latina y el Caribe*. Editorial Universidad de Talca. Talca. Chile. 135 p.

Pizarro, R.; Saavedra, J. 1999. *Análisis comparativo de técnicas de recuperación de suelos en áreas degradadas; efectos en la humedad del suelo la sobrevivencia y crecimiento de *Pinus radiata* (D. Don)*. Microcuenca del Estero Barroso, VII Región. Tesis para optar al título de Ingeniero Forestal, Universidad de Talca. Talca. Chile.

Pizarro, R.; Abarza, A.; Farías, C. 2001. *Análisis comparativo de las curvas intensidad-duración-frecuencia IDF, en 6 estaciones pluviográficas distribuidas en la VII Región del Maule*. En Acta del XV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. p, 15-25.

Pizarro, R.; Flores, J.; Sangüesa, C.; Martínez, A. 2003. *Diseño Hidrológico de las zanjas de infiltración*. En Seminario Internacional: Restauración Hidrológico-Forestal para conservación y aprovechamiento de aguas y suelos. 20 y 21 de noviembre. Santiago, Chile. (http://eias.utralca.cl/seminario_internacional.htm).

Pizarro, R.; Sangüesa, C.; Flores, J.; Martínez, A.; Ponce, M. 2004. Revisión y análisis de prácticas tradicionales de conservación de aguas y suelos en zonas áridas y semiáridas de Chile Central. Chile. 111 p.

Shao, S. 1970. Estadística para economistas y administradores de empresas. Editorial Herrero Hermanos, SUCS. S.A. México. 786 p.

Simón, E.; Mintegui, J.; García, J.; Robredo, J. 1993. La restauración hidrológico-forestal en las cuencas hidrográficas de la vertiente mediterránea. Información Técnica N° 22/93. Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía. Sevilla. España. 325 p.

Soto, G. 1997. Mapa preliminar de la desertificación en Chile - por comunas. Corporación Nacional Forestal CONAF. Ministerio de Agricultura. Chile. 88 p.

Témez, J. 1978. Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. Dirección General de Carreteras. Madrid. España. 111p.

Comunicaciones Personales

Pedro Bravo. 2002. Director Regional de la Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas. Chile

Emilio Cuevas. 2001. Departamento de Tecnología e Industria de la madera. Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad de Talca.

Francisco Zamudio. 2001. Departamento de Producción Forestal. Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad de Talca.

Internet

Biblioteca Nacional

<http://www.bcn.cl/imag/pdf/indiceleyes/dl/2565.pdf>. 2004. Ley N° 19.561. Ministerio de agricultura. Gobierno de Chile. Chile

Comisión Nacional de Riego

<http://www.chileriego.cl/docs/054-02.doc>. 2004. Coeficientes de escorrentía en Manual de carreteras, Ministerio de Obras Públicas. CNR. Gobierno de Chile. Chile

Corporación Chilena de la Madera

http://www.corma.cl/publicaciones/temas_de_fondo/A4-N10_03-12_contenido.html. 2004. De Balances y desafíos. Dr. Ing. Samuel Francke. CORMA. Temas de Fondo, Año 4, N° 8, Febrero 2003. Chile

Corporación Nacional Forestal

<http://www.conaf.cl>. 2004. Recuperación de suelos degradados; Técnicas de conservación de suelos; Tabla de costos por obra de recuperación de suelos. CONAF. Gobierno de Chile. Chile

Instituto de Desarrollo Agropecuario

<http://www.indap.cl>. 2004. Créditos de enlace para forestación

Instituto Forestal

<http://www.infor.cl/webinfor/investigacion/proyectos/3311.htm>. 2004. Programa de Transferencia Tecnológica para un Desarrollo Forestal Sustentable de Pequeños y Medianos Propietarios

Servicio Agrícola Ganadero

<http://www.sag.gob.cl/framearea.asp?cod=8>. 2004. Sistema de Incentivos para la Recuperación de Suelos Degradados (SIRSD)

Sociedad Estándares de Ingeniería para Aguas y Suelos Ltda.

<http://eias.otalca.cl>. 2002. Experiencias nacionales en obras de conservación de aguas y suelos. Universidad de Talca. Chile.

UNESCO - Programa Hidrológico Internacional

<http://www.unesco.org.uy/phi/bibli.htm>. 2003. Análisis comparativo de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) en 6 estaciones pluviográficas de la VII Región del Maule. Chile

Glosario

Para un mayor y mejor entendimiento de las temáticas expuestas en este libro, se elaboró el siguiente glosario de palabras clave, y que fue extraído de una revisión bibliográfica de internet y textos ligados a la conservación de aguas y suelos

A

Acuífero: Una formación de roca o de suelo que contiene agua suficiente para abastecer diferentes necesidades.

Agua subterránea: Agua existente debajo de la superficie terrestre en una zona de saturación, donde los espacios vacíos del suelo están llenos de agua.

Agua superficial: Agua que fluye o se almacena sobre la superficie del terreno. Es equivalente a: agua de superficie.

Año hidrológico: Período continuo de doce meses seleccionados de manera que los cambios globales en el almacenamiento sean mínimos, por lo que la cantidad sobrante de un año al siguiente se reduce al mínimo.

Año húmedo: Año en que la precipitación o el caudal es significativamente superior a lo normal.

Año seco: Año de sequía durante el cual las precipitaciones o el caudal de los cursos de agua son significativamente inferiores a los habituales.

Aprovechamiento del agua: Utilización o alteración de la condición natural del agua con la intención de aumentar la producción de bienes y servicios.

Árbol: Vegetal que tiene altura (sobre los 5 metros) y forma definida, se ramifica en altura.

Arbusto: Vegetal de hasta 5 metros de altura, sin un tronco definido y la copa nace desde el suelo.

B

Balance hídrico: Balance de agua basado en el principio de que durante un cierto intervalo de tiempo el aporte total a una cuenca o masa de agua debe ser igual a la salida total de agua más la variación neta en el almacenamiento de dicha cuenca o masa de agua.

Bosque: Sitio poblado con formaciones vegetales en las que predominan árboles y que ocupa una superficie de por lo menos 5.000 m², con un ancho mínimo

de 40 metros, con cobertura de copa arbórea que supere el 10% de dicha superficie total en condiciones áridas y semiáridas y el 25% en circunstancias más favorables.

C

Canal de desviación: Obra de recuperación de suelo, manual o mecanizada, que se sitúa en la parte superior de la ladera para capturar la escorrentía procedente de las cotas superiores.

Canal de evacuación de avenidas: Canal destinado a encauzar el exceso de agua procedente de las crecidas (exceso con respecto al caudal que puede fluir por un curso de agua con seguridad).

Capacidad de evaporación: Cantidad de vapor de agua que puede ser emitida por una superficie de agua pura en las condiciones existentes.

Capacidad de infiltración: Velocidad máxima a la que el agua puede ser absorbida por un terreno determinado, por unidad de superficie y en ciertas condiciones.

Capacidad de retención de agua en el suelo: Agua contenida en el suelo, disponible para las plantas. Normalmente se considera que es el agua contenida en el suelo comprendida entre el índice de marchitez y la capacidad de campo. En este contexto, la capacidad de retención de agua de un terreno se identifica con el agua disponible.

Capacidad de uso de suelos: Es cuando se considera no solo la aptitud actual de un suelo, sino también su potencialidad ante la presentación de limitantes con posibilidades de ser modificadas.

Capacidad hidráulica: Característica física, de un cauce abierto que, en función de la superficie de la sección transversal y su rugosidad, multiplicado por la raíz cuadrada de la pendiente, da el caudal correspondiente del cauce o canal.

Cárcava: Formas erosivas, a modo de hendidura o excavación del terreno, producidas por las aguas de arrollada.

Caudal: Volumen de agua que fluye a través de una sección transversal de un río o canal en la unidad de tiempo.

Ciclo hidrológico: Sucesión de fases por las que pasa el agua en su movimiento de la atmósfera a la tierra y en su retorno a la misma: evaporación del agua del suelo, mar y aguas continentales, condensación del agua en forma de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o en masas de agua y reevaporación.

Cisterna: El tanque donde se recolecta agua, generalmente de lluvia.

Coefficiente de escorrentía: (1) Relación entre la escorrentía y la precipitación (ambas expresadas en altura de agua). (2) Coeficiente utilizado en la fórmula del método racional (adimensional).

Conservación de suelos: Tecnologías que conducen al óptimo uso del suelo alcanzando su mayor capacidad de producción sin que se provoque su deterioro físico, químico o biológico.

Contenido de humedad del suelo: Porcentaje de agua en el suelo, expresada con relación al peso del suelo seco o en volumen.

Control de avenidas: Protección de áreas de terreno en caso de desbordamiento o minimización de los daños causados por avenidas.

Cubierta vegetal: Cobertura que forman las hojas y ramas de las copas de los árboles y otras plantas.

Cuenca: Es la unidad espacial natural de la biogeoestructura, donde se integran los componentes sólidos, líquidos y gaseosos, formando unidades definidas de ocupación del espacio. El conjunto de cuencas constituye una región.

Cuenca hidrográfica: Se refiere a áreas geográficas limitadas por la divisoria de aguas, que por su configuración topográfica contribuyen con los aportes de su escurrimiento a la formación del caudal de un río. Es equivalente a: cuencas de drenaje; cuencas fluviales; cuencas hídricas superficiales; cuencas hidrológicas.

Curva de frecuencia: Curva que relaciona los valores posibles de una variable, por ejemplo el valor de un suceso hidrológico específico, con la frecuencia de su ocurrencia.

Curva de gasto: Curva que muestra la relación entre la altura y el caudal de un curso de agua en una estación fluviométrica. Si se traduce a números, es una tabla de gasto.

Curva de nivel: Es una línea imaginaria sobre la superficie de la tierra que une puntos de igual nivel o altura.

Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia: Curva que muestra la probabilidad de diversas intensidades de lluvia en períodos cortos para diversas duraciones de precipitación en un determinado lugar. A menudo se trata de un conjunto de curvas, cada una indicando una determinada frecuencia de ocurrencia o un período de retorno expresado en años.

D

Déficit hídrico: Diferencia acumulada entre evapotranspiración potencial y precipitación durante un período determinado, en el cual la precipitación es la menor de las dos variables.

Deforestación: Acción de eliminar el bosque de forma permanente para un uso no forestal, con reducción de cobertura de copas de árboles a menos del 10%.

Degradación de los suelos: Es todo proceso de pérdida parcial o total de la productividad de la tierra.

Degradación hidrográfica: Degeneración de una red hidrográfica en las partes planas de una cuenca, tanto más intensa cuanto más árido es el clima.

Desarrollo sustentable: (1) Proceso de mejoramiento sostenido y equitativo de la calidad de vida de las personas, fundado en medidas apropiadas de conservación y protección del medio ambiente, de manera de no comprometer las expectativas de las generaciones futuras. (2) Concepción del desarrollo que la armonía entre éste y el medio ambiente puede y debe constituir una meta universal. Dicha armonía no es un estado fijo sino un proceso de cambio por el cual la explotación de los recursos, la dirección de las inversiones, la orientación de los procesos tecnológicos y la modificación de las instituciones concuerdan tanto con las necesidades presentes como con las futuras.

Desertificación: Se entiende la degradación de las tierras de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas resultante de diversos factores, tales como las variaciones climáticas y las actividades humanas.

Desertización: Se entiende por la degradación de las tierras de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, resultante de factores exclusivamente naturales.

Dique: (1) Estructura que atraviesa un curso de agua dotada de una serie de compuertas u otros mecanismos de intervención, con el fin de controlar el nivel del agua aguas arriba, regulando el flujo o derivando caudales hacia un canal. (2) Obra construida para retener el flujo del agua dentro de un área determinada a lo largo de su cauce o para prevenir inundaciones debidas a mareas u ondas.

Diques de postes: Obra de cauces y de cárcavas, que actúa por resistencia mecánica, en una estructura de postes verticales y horizontales de una altura entre 0,5 a 1,5 metros.

Dique natural: Pequeño banco aluvial, contiguo al cauce de una corriente, compuesto por sedimentos depositados por aguas de crecida que han desbordado los márgenes del cauce.

Diseño óptimo: Diseño de un sistema basado en la selección o combinación de todas las variables necesarias, para maximizar una función objetiva (como por ejemplo los beneficios netos), sujeta a las restricciones existentes.

Distribución de frecuencia: Especificación de la manera en que las frecuencias de los elementos de una población se distribuyen de acuerdo con la variable aleatoria de la cual son una manifestación.

Distribución de probabilidad: Distribución que expresa la probabilidad de un valor de la variable en función de dicha variable.

Duración de tormenta: Período comprendido entre el principio y final de la precipitación, ya sea total o por encima de un umbral dado.

E

Ecuación de balance: Ecuación que expresa el balance entre aportes, salidas y cambios en el almacenamiento en cualquier masa de agua a lo largo de un periodo de tiempo.

Ecuación de continuidad: Ecuación que describe la conservación de masa en una materia fluyente (por ejemplo, el agua).

Empalizada: Obra de regulación de flujos hídricos y contención de sedimentos en taludes y laderas inestables. Presenta una altura entre 0,25 y 0,7 metros y un largo variable. En su construcción se utilizan, en los verticales, postes o rodrigones, que se distancian de 0,5 a 0,8 metros, y postes u otros materiales, para los horizontales.

Erosión del suelo: Remoción y transporte de partículas de suelo por movimiento de un fluido: agua o viento. En el caso del agua, la erosión laminar es producida por las gotas de lluvia y un flujo superficial ligero, mientras que la erosión interlaminar se produce cuando aumenta el flujo de agua. Con la erosión en surcos se llegan a producir canales y regueros. Por último, el movimiento en masa y la formación de cárcavas corresponde a los procesos erosivos más graves y visibles.

Erosión eólica: Es la manifestación de la acción del viento sobre la superficie terrestre (expresada en lenguas de avance, médanos, pavimentos y acumulaciones).

Erosión hídrica: Es la manifestación de la acción de las lluvias sobre la superficie terrestre (expresada a través de cárcavas, erosión laminar, denudación y arrastre de material).

Escorrentía: Parte de la precipitación que se presenta en forma de flujo en un curso de agua. La pérdida de suelos, por lo general en terrenos inclinados y sin cobertura vegetativa es causada principalmente por la acción del agua.

Escurrimiento superficial: Movimiento del agua desde una mayor altura a otra menor respecto del nivel de mar y que generalmente está asociado por el fenómeno de la erosión pluvial.

Estación de referencia: Estación hidrológica establecida en cada país o región natural, para conseguir series continuas de observaciones hidrológicas y relativamente libre de la influencia de cambios artificiales pasados o futuros.

Estación permanente: Estación hidrométrica en la que se observan, durante un período de varios años, uno o varios elementos, teniendo en cuenta la importancia de dichos elementos en el entorno físico. La estación está generalmente equipada con instrumentos de registro.

Estación pluviométrica: Estación en la que sólo se realizan observaciones acerca de la precipitación.

Evapotranspiración: Pérdida de agua de un área específica y para un período de tiempo determinado, como consecuencia de la evaporación de la superficie del suelo y de la transpiración de la planta.

Evapotranspiración potencial: Cantidad máxima de agua capaz de ser evaporada en un clima dado, por una cubierta vegetal continua y bien alimentada de agua. Por lo tanto incluye la evaporación del suelo y la transpiración vegetal en una región específica y en un intervalo de tiempo dado. Se expresa en altura de agua.

F

Forestación: Acción de poblar con especies arbóreas o arbustivas terrenos que carezcan de ella o que, estando cubiertas de vegetación, esta no sea susceptible de cosecha económica ni mejoramiento mediante manejo.

Fórmula de Manning: Ecuación que se usa para calcular la velocidad de la corriente del agua en un canal abierto.

G

Gaviones: Obra de mampostería de cauces, de cárcavas y de contención de taludes y laderas inestables. Consiste en un conjunto de paralelepípedos fabricados

con malla hexagonal en alambre de acero galvanizado, rellena con piedras (de preferencia grava de río). La altura, largo y ancho de la obra se calculará según las condiciones del terreno y el tipo de relleno del gavión, como profundidad del cauce, cárcava o talud, deformación de la obra, capacidad de soporte y estabilidad del suelo. En tratamientos menores se sugiere construir estructuras con un límite de altura entre 2 a 3 metros.

H

Hidrología: Ciencia que estudia las aguas superficiales y subterráneas de la Tierra, y su aparición, circulación y distribución, tanto en el tiempo como en el espacio, sus propiedades biológicas, químicas y físicas, sus reacciones con el entorno, incluyendo su relación con los seres vivos.

Humedad del suelo: Humedad contenida en la porción de suelo por encima del nivel freático, incluyendo el vapor de agua presente en los poros del suelo.

Humedad precedente: El grado de humedad existente en un suelo al iniciarse el periodo de escorrentía.

I

Infiltración: Es la capacidad que tiene el suelo para absorber agua en los diferentes estratos.

Infiltrómetro: Dispositivo para medir la velocidad de infiltración.

Intensidad de lluvia: Tasa de lluvia expresada en unidades de altura por unidad de tiempo.

L

Lavado del suelo: Arrastre de nutrientes por medio de procesos naturales (principalmente por el flujo de agua).

M

Manejo sustentable: Administración y uso racional de los ambientes y sus recursos naturales, basado en pautas que permiten su conservación y rendimiento sostenido en el tiempo.

Microterrazza manual: Obra manual al suelo, que se establece en curvas de nivel y que presenta una sección triangular, con una base levemente inclinada (1%) hacia el borde interno, con un ancho de base de 0,5 a 0,8 metros, una altura entre 0,2 a 0,25 metros y con una pendiente lateral de 1:z, donde $z = 0,3$ a $0,5$.

Aguas debajo de la obra se deberá construir un camellón de una altura de 0,2 a 0,15 metros, dimensiones que deben permitir regular la escorrentía e infiltrar un volumen de agua estimado según la precipitación de diseño.

Microterrazza con escarificado: Tratamiento mecanizado de suelos que consiste en un subsolado a una profundidad mínima de 70 cm, en curvas de nivel utilizando bulldozer o tractor, aplicado en el borde interior de una microterrazza con ancho mínimo de 0,5 m y con remoción del suelo superficial (escarificado).

Muretes de piedras: Esta obra se puede utilizar en la contención de bases de taludes, control de cauces y laderas con erosión lineal de canalículos o zanjas incipientes. Puede utilizarse como dique, para lo cual se debe construir un vertedero de 1/6 de la longitud de la obra y un dissipador de energía de 1,5 veces la altura efectiva.

Muretes de sacos: Esta obra consiste en disponer sacos de polietileno «tipo malla sombra» de 50 a 65% de cobertura, de 0,6 m de largo y de 0,4 m de ancho, rellenos con tierra, entramados (Como ladrillos en albañilería) y escalonados (con peldaños de 6 a 10 cm.), con el objeto de formar un muro que contenga sedimentos, controle canalículos, zanjas incipientes y cabeceras de cárcavas medianas y menores.

Muro de contención con neumáticos: Esta obra se puede utilizar en el control de cauces menores y en la contención de bases de taludes y laderas con erosión lineal de canalículos o zanjas incipientes. Se utilizan neumáticos usados (aro 13 - 15), rellenos con tierra e imbricados, como ladrillos en albañilería y escalonados con peldaños de 5 a 8 cm.

N

Nivel freático: Superficie en la zona de saturación de un acuífero libre sometido a la presión atmosférica.

O

Obras lineales: Obra de regulación de flujos hídricos y de contención de sedimentos en taludes y laderas inestables. Presenta una altura entre 0,20 a 0,40 metros y un largo variable. En su construcción se utilizan estacas o rodrigones, para los verticales, y fajinas (haz de ramas) y/o revestimientos de neumáticos, para las líneas horizontales.

Las fajinas se alambran a las estacas verticales, que se disponen cada 0,8 metros en la horizontal. Deben enterrarse a más de 10 cm de profundidad y cubrirse con una malla raschel «tipo sombra» de 80% de cobertura.

Los revestimientos de neumáticos deben ser extendidos y enterrados entre 5 a 10 cm y clavados a los postes verticales, cuidando que la cara interior de los revestimientos quede en dirección hacia el talud. Las estacas verticales se colocan cada 0,4 metros en la horizontal.

Ordenamiento territorial: Proceso de programar la distribución y la localización espacial de los componentes de la estructura territorial, como medio de implementar las estrategias de una propuesta de desarrollo regional, con especial énfasis en aspectos económicos, de distribución de la población y de manejo ambiental.

P

Periodo de retorno de la intensidad de la lluvia: Intervalo medio, en años, entre la ocurrencia de una lluvia de una intensidad dada y otra de intensidad igual o mayor.

Plantación forestal: El establecimiento de plantas leñosas en terreno desprovisto de árboles.

Pluviógrafo: Instrumento que incluye un dispositivo de registro cronológico de la altura de precipitación.

Pluviómetro: Instrumento para medir la altura de agua de precipitación en un punto.

Pluviómetro registrador: Instrumento que incluye un dispositivo de registro cronológico de la altura de precipitación.

Pluviómetro totalizador: Medidor de precipitación que se utiliza en estaciones controladas con poca frecuencia.

Porosidad: Relación entre el volumen de huecos y el volumen total de una fracción definida de suelo. Generalmente se expresa en porcentaje.

Precipitación: (1) Elementos líquidos o sólidos procedentes de la condensación del vapor de agua que caen de las nubes o son depositados desde el aire en el suelo. (2) Cantidad de precipitación caída sobre una unidad de superficie horizontal por unidad de tiempo.

Precipitación efectiva: (1) Parte de la precipitación que contribuye a la escorrentía. En algunos procesos el flujo subsuperficial se excluye completamente de la escorrentía directa, con lo que la precipitación efectiva es igual al exceso de precipitación. (2) En agricultura, parte de la lluvia que permanece en el suelo y contribuye al crecimiento de las cosechas.

R

Radio hidráulico: Cociente entre el área de la sección transversal mojada y el perímetro mojado de un curso de agua o de un conducto cerrado.

S

Sección de aforo: Sección transversal de un cauce abierto en el que se realizan mediciones de velocidad y profundidad de las aguas.

Sedimentación: Depósito de partículas previamente erosionadas y transportadas por los agentes geológicos externos desde un área generadora a un área receptora o cuenca sedimentaria. La sedimentación de partículas puede obedecer a causas mecánicas, químicas o biológicas.

Subsolado con camellón: Tratamiento mecanizado al suelo, que combina subsolado con camellón y surcos en ambos costados. El subsolado debe tener una profundidad mínima de 70 cm, en curvas de nivel, y las dimensiones mínimas del camellón, ubicado sobre el subsolado, deben ser de 1 m de ancho y 30 cm de altura, de tal modo que permita detener la escorrentía superficial.

Suelo: Parte superior de la corteza terrestre que mantiene el desarrollo vegetal y que evoluciona gracias al efecto de los factores determinantes de la edafogénesis (clima, tiempo, actividad biológica, flujo del agua).

T

Talud: Corte del suelo en forma inclinada (no a plomo).

Terrazas: Son obras de conservación de suelo en terreno con pendientes.

V

Variable hidrológica: Variable relativa al ciclo hidrológico, como por ejemplo: nivel de aguas (altura), caudal o precipitación.

Vegetación: Estructura espacial o modo de organización del conjunto de especies vegetales que se encuentran en un lugar determinado.

Velocidad de infiltración: Caudal de agua de infiltración a través de un medio poroso no saturado, por unidad de área del espacio intersticial por el que fluye el agua, perpendicularmente a la dirección del flujo. Es la media de la velocidad real de un flujo no saturado.

Velocidad de sedimentación: Velocidad final de caída a la que se produce el depósito de los sólidos sedimentables en suspensión.

Volumen de lluvia: Volumen de lluvia diario, mensual, anual o el correspondiente a una tormenta, que se obtiene de medidas estándares diarias realizadas a las 8 a.m.

Z

Zanja de infiltración: Obra de recuperación de suelos que puede ser construida de forma manual o mecanizada, y se sitúa en la parte superior o media de una ladera para la captura y almacenamiento de la escorrentía procedente de las cotas superiores.

Zona semiárida: (1) Zona en la que, en algunos años, la precipitación no es suficiente para el mantenimiento de los cultivos. (2) Zona en la que la evaporación sobrepasa frecuentemente a la precipitación.

Referencias

Internet

<http://www.medioambiente.gov.ar/areas/subordamb/glosario/lista-terminos.asp>

<http://ppathw3.cals.cornell.edu/iipmweb/Glosario.pdf>

http://www.semarnat.gob.mx/cecaadesu/informacion/digital/manual_conservacion.shtml

<http://www.uwex.edu/farmasyst/spanish/pdf/files/12gloss.pdf>

<http://www.fao.org/docrep/W2962S/w2962s0l.htm>

<http://leu.irnase.csic.es/microlei/manual1/anexos/anexo1.htm>

http://www.jmarcano.com/glosario/glosario_s.html

<http://www.educambiente.cl/glosario.asp>

<http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/indexes.htm>

http://www.conaf.cl/html/recursos/rec_suelos2.html

<http://www.cig.ensmp.fr/~hubert/glu/HINDEN.HTM>

Libros

Soil Conservation Society of America. Glosario de conservación de suelos y aguas. Centro Regional de Ayuda Técnica (RTAC), Agencia para el Desarrollo Internacional (A.I.D.). Segunda Edición. Editorial Rabasa S.A. México.

Revisión y análisis de prácticas de conservación de aguas y suelos en zonas áridas y semiáridas de Chile Central, 2004. Sociedad EIAS Ltda. Pizarro R., Sangüesa C., Flores J., Martínez E., Ponce M.

Anexos

- Anexo I:** Decreto Ley N° 701, de 1974.
- Anexo II:** Valores críticos de «D» en la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov.
- Anexo III:** Definición de la sección hidráulica óptima.
- Anexo IV:** (a) Intensidades máximas de precipitación para la estación pluviográfica de Péncahue (VII Región), según las curvas IDF y (b) Valores de los parámetros "K" calculados para la estación pluviográfica de Péncahue (VII Región).
- Anexo V:** Valores de «n» por Horton, para ser empleado en la fórmula de Manning.

Anexo I

Decreto Ley N° 701, de 1974

Texto vigente según modificaciones introducidas en el D.L. N° 2.565, de 1979, Ley N° 18.959 y Ley N° 19.561 y referida a la recuperación de suelos degradados

Fuente: www.conaf.cl

Artículo 4°.- La calificación de terrenos de aptitud preferentemente forestal será efectuada por la Corporación, a solicitud del propietario, quien la presentará conjuntamente con la indicación de la superficie sujeta a forestación. La solicitud podrá comprender, además, actividades de recuperación de suelos degradados o de estabilización de dunas, y deberá acompañarse de un estudio técnico del terreno, elaborado por un ingeniero forestal o ingeniero agrónomo, que contendrá la proposición calificatoria, las actividades que vayan a ejecutarse, como asimismo, las medidas de preservación y protección por adoptar, de acuerdo con las normas que se establezcan en el reglamento.

La Corporación deberá pronunciarse mediante resolución emitida dentro del plazo de 60 días, contado desde la fecha de ingreso de la solicitud a la oficina correspondiente. Si la Corporación no se pronunciare dentro del señalado plazo, se entenderá aprobada la solicitud. No obstante, la Corporación podrá establecer, para determinadas épocas del año o para ciertas áreas geográficas de difícil acceso, plazos superiores al señalado, los que no podrán exceder de 120 días.

La Corporación deberá expedir un certificado que será válido para todos los casos en que la ley o cualquier reglamento exija acreditar la calidad de terreno de aptitud preferentemente forestal.

Artículo 15°.- Para los efectos de hacer efectivas las bonificaciones mencionadas en el artículo 12, la Corporación fijará, en el mes de Julio de cada año y previa aprobación de los Ministerios de Agricultura y de Hacienda, el valor de los costos de las actividades bonificables, de conformidad a lo dispuesto en el artículo 12, para la temporada del año siguiente, según las diversas categorías de suelos, regiones, especies arbóreas o arbustivas y demás elementos que configuren dichos costos, tales como, adquisición de plantas, actividades de preparación y cercado del terreno, establecimiento de la plantación, labores de protección y los gastos generales asociados a las actividades bonificables. Tratándose de pequeños propietarios forestales, también se considerará la asesoría profesional y los costos de poda y raleo. Los referidos valores se reajustarán conforme a la variación que experimente el Índice de Precios al Consumidor, determinado por el Instituto Nacional de Estadísticas entre la fecha de fijación de ellos y el mes anterior a aquél en que se haga efectivo el cobro de la bonificación.

Si la Corporación no fijare dichos costos dentro del plazo ya señalado, se estará, para los efectos del cálculo y pago de la bonificación a los valores contenidos en la última tabla de costos fijada, los cuales se reajustarán, en este caso y para estos efectos, en la misma forma señalada en el inciso anterior.

El pago de las bonificaciones que corresponda se efectuará por la Tesorería General de la República en el año presupuestario en que éstas se devenguen o con prioridad en el año siguiente, debidamente reajustadas.

Artículo 12°.- El Estado, en el período de 15 años, contado desde el 1° de enero de 1996, bonificará, por una sola vez por cada superficie, un porcentaje de los costos netos de las actividades que se señalan a continuación, de acuerdo con las especificaciones que se indiquen en la tabla de costos a que se refiere el artículo 15 y siempre que ellas se ejecuten con posterioridad a la aprobación de la calificación de terrenos a que se refiere el artículo 4°, cuando corresponda. Dichas actividades son:

- a) La forestación en suelos frágiles, en ñadis o en áreas en proceso de desertificación;
- b) La forestación en suelos degradados y las actividades de recuperación de dichos suelos o de estabilización de dunas;
- c) El establecimiento de cortinas cortavientos, en suelos de cualquier clase, que se encuentren degradados o con serio peligro de erosión por efecto de la acción eólica;
- d) La forestación que efectúen los pequeños propietarios forestales en suelos de aptitud preferentemente forestal o en suelos degradados de cualquier clase, incluidas aquellas plantaciones con baja densidad para fines de uso silvopastoral. En este caso, la bonificación será de un 90% respecto de las primeras 15 hectáreas y de un 75% respecto de las restantes. Tratándose de las comunidades agrícolas o indígenas a que se refiere el artículo 2°, la superficie máxima por forestar, con derecho a acceder a bonificación por esta causal, será la que resulte de multiplicar el número de comuneros por 15 hectáreas.

La bonificación del 90% se pagará en un 75% de los costos netos una vez verificado el prendimiento y el 15% restante a los 3 años de efectuada la plantación, cuando se compruebe el establecimiento de ésta.

- e) La primera poda y el raleo de la masa proveniente de las forestaciones realizadas por los pequeños propietarios forestales, siempre que se hagan dentro de los plazos que establezca el reglamento, y
- f) Las forestaciones en suelos degradados con pendientes superiores al 100%.

El porcentaje de bonificación será del 75% de los costos para las actividades a que se refieren las letras a), b), c) y e), beneficio que se pagará conjuntamente con las bonificaciones por recuperación de suelos degradados y por estabilización de dunas, cuando corresponda.

El porcentaje de bonificación sobre los costos netos será de 90% para la forestación señalada en la letra f). La masa proveniente de la misma podrá ser objeto de explotación comercial sólo bajo la modalidad de cortas selectivas o de protección, según especie.

El sistema de otorgamiento de bonificaciones será modificado si durante tres años consecutivos el monto destinado al pago de las mismas excediera, en moneda del mismo valor adquisitivo, la cantidad total de bonificación efectivamente pagada durante el año 1996.

Cumplida esta condición, se harán concursos públicos para quienes postulen a bonificaciones por las causales indicadas en las letras a), b), c) y f) precedentes. Sin embargo, para quienes postulen en virtud de las causales indicadas en las letras d) y e), el sistema de otorgamiento de bonificaciones permanecerá inalterado.

Las bonificaciones percibidas o devengadas se considerarán como ingresos diferidos en el pasivo circulante y no se incluirán para el cálculo de la tasa adicional del artículo 21 de la Ley de la Renta ni constituirán renta para ningún efecto legal hasta el momento en que se efectúe la explotación o venta del bosque que originó la bonificación, oportunidad en la que se amortizará abonándola al costo de explotación a medida y en la proporción en que ésta o la venta del bosque se realicen, aplicándose a las utilidades resultantes el artículo 14, inciso primero, del presente decreto ley.

Para los efectos previstos en el inciso precedente, anualmente se les aplicará a las bonificaciones devengadas o percibidas, consideradas como ingresos diferidos en el pasivo circulante, las normas sobre corrección monetaria establecidas en la Ley sobre Impuesto a la Renta, reajustándose en igual forma que los costos incurridos en el desarrollo de las plantaciones forestales incluidos en las partidas del activo.

El Presidente de la República, mediante decreto supremo, expedido por intermedio del Ministerio de Agricultura, reglamentará el pago de las mencionadas bonificaciones y fijará las bases del concurso público a que se refiere el inciso cuarto.

El Instituto de Desarrollo Agropecuario establecerá líneas de crédito de enlace para financiar la forestación de los pequeños propietarios forestales, de acuerdo con las normas especiales que rigen para los créditos de fomento que otorga dicho Instituto.

Anexo II
Valores críticos de «D» en la prueba de bondad de ajuste de
Kolmogorov-Smirnov

Cuadro 28. Valores críticos de «D» en la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov

Tamaño de la Muestra (n)	Nivel de significancia para D $ F_{(x)} - S_n(x) $				
	0,2	0,15	0,1	0,05	0,01
1	0,900	0,925	0,950	0,975	0,995
2	0,684	0,726	0,776	0,842	0,929
3	0,565	0,597	0,542	0,708	0,828
4	0,494	0,525	0,564	0,624	0,733
5	0,446	0,474	0,510	0,565	0,669
6	0,410	0,436	0,470	0,521	0,618
7	0,381	0,405	0,438	0,486	0,577
8	0,358	0,381	0,411	0,457	0,543
9	0,339	0,360	0,388	0,432	0,514
10	0,322	0,342	0,368	0,410	0,490
11	0,307	0,326	0,352	0,391	0,468
12	0,295	0,313	0,338	0,375	0,450
13	0,284	0,302	0,325	0,361	0,433
14	0,274	0,292	0,314	0,349	0,418
15	0,266	0,283	0,304	0,338	0,404
16	0,258	0,274	0,295	0,328	0,392
17	0,250	0,266	0,286	0,318	0,381
18	0,244	0,259	0,278	0,309	0,371
19	0,237	0,252	0,272	0,301	0,363
20	0,231	0,246	0,264	0,294	0,356
25	0,210	0,220	0,240	0,270	0,320
30	0,190	0,200	0,220	0,240	0,290
35	0,180	0,190	0,210	0,230	0,270
Más de 35	$\frac{1,07}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,07}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,07}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,07}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,07}{\sqrt{n}}$

Adaptado de F.J. Massey, Jr., «The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit»,
 Journal Amer. Stat Assn., Vol. 46, 1951, pp. 68-78. Con permiso del autor y los editores
 (Citado por Pizarro y Novoa, 1986)

Los valores D proporcionados en la tabla son valores críticos asociados con valores seleccionados de n. Cualquier valor D el cual es mayor o igual que el valor tabulado es significativo en el nivel de significancia indicado.

Anexo III

Definición de la sección hidráulica óptima

Si se analiza la ecuación de Manning (capítulo 3), en una sección dada A, con una pendiente uniforme s, con un nivel de caudal Q estable, y definida una rugosidad, la mejor sección transversal estará dada, cuando el radio hidráulico sea máximo. Así, si se define al radio hidráulico R, como el cociente entre la sección A, y el perímetro mojado P, el radio máximo estará dado cuando el perímetro mojado sea mínimo, lo cual significa menor cantidad de materiales empleados en la construcción, y trabajo asociado, todo lo cual determina un ahorro importante de costos.

Con el objetivo de visualizar lo anterior, y para definir el dimensionamiento adecuado de un canal trapecial, se desarrollará el esquema matemático de cálculo. De esta manera, si se analiza la figura 33, se desprende que:

$$A = b \cdot h + h^2 \operatorname{tg} \alpha$$

$$P = b + 2 \cdot \frac{h}{\cos \alpha} = \frac{A}{h} - h \cdot \operatorname{tg} \alpha + 2 \frac{h}{\cos \alpha}$$

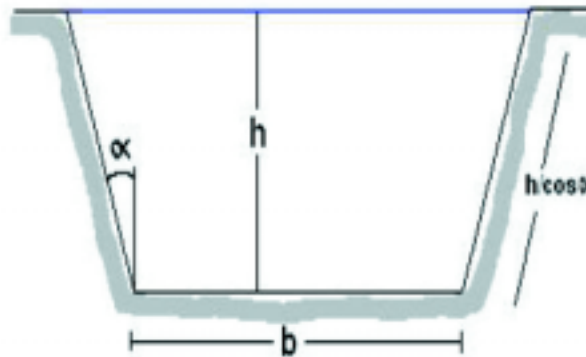


Figura 33. Sección transversal de un canal trapecial

Por consiguiente, operando de tal forma que la base b no se incorpore al cálculo, queda;

$$R = \frac{A}{\frac{A}{h} - h \cdot \operatorname{tg} \alpha + 2 \frac{h}{\cos \alpha}} = \frac{A \cdot h \cdot \cos \alpha}{A \cdot \cos \alpha + h^2 (2 - \operatorname{sen} \alpha)} \quad (1)$$

$$\frac{\partial R}{\partial h} = \frac{A \cdot \cos\alpha (A \cdot \cos\alpha + h^2 (2 - \operatorname{sen}\alpha) - 2A \cdot h^2 \cdot \cos\alpha (2 - \operatorname{sen}\alpha))}{(A \cdot \cos\alpha + h^2 (2 - \operatorname{sen}\alpha))^2} = 0 \quad (2)$$

con lo que,

$$\frac{\partial R}{\partial h} = A \cdot \cos\alpha + h^2 (2 - \operatorname{sen}\alpha) = 0 \quad (3)$$

$$A = \frac{h^2 (2 - \operatorname{sen}\alpha)}{\cos\alpha} \quad (4)$$

o bien,

$$h = \sqrt{\frac{A \cos\alpha}{2 - \operatorname{sen}\alpha}} \quad (5)$$

Reemplazando (4) en (1), resulta,

$$R = \frac{(2 - \operatorname{sen}\alpha) \cdot h^3}{h^2 (2 - \operatorname{sen}\alpha) + h^2 (2 - \operatorname{sen}\alpha)} \quad (6)$$

de lo que se infiere

$$R = \frac{h}{2} \quad (7)$$

Por lo que, la maximización del radio hidráulico, con el fin de asegurar un diseño óptimo de canales trapeciales, ocurre cuando éste se hace igual al tirante o altura del canal, dividido por dos.

Anexo IV

(a) Intensidades máximas de precipitación para la estación pluviográfica de Penciahue (VII Región), según las curvas IDF

Cuadro 29. Intensidades de precipitación (mm/h). Estación Penciahue

Duración (h)	Periodos de retorno (T) en años								
	T5	T10	T20	T30	T40	T 50	T60	T75	T100
1	12,37	14,11	15,78	16,74	17,42	17,94	18,37	18,89	19,56
2	8,58	9,73	10,84	11,47	11,92	12,27	12,55	12,90	13,34
4	6,53	7,41	8,25	8,74	9,08	9,34	9,56	9,82	10,16
6	5,32	6,04	6,72	7,12	7,40	7,61	7,79	8,00	8,28
8	4,55	5,21	5,84	6,21	6,47	6,66	6,83	7,03	7,28
12	3,63	4,25	4,85	5,20	5,44	5,63	5,78	5,97	6,21
24	2,42	2,92	3,40	3,67	3,87	4,02	4,14	4,29	4,48

(b) Valores de los parámetros "K" calculados para la estación pluviográfica de Penciahue (VII Región)

Cuadro 30. Parámetro k. Estación Penciahue.

Duración (h)	Parámetro k para los distintos periodos de retorno (T) en años								
	T5	T10	T20	T30	T40	T 50	T60	T75	T100
1	5,11	4,83	4,64	4,56	4,50	4,46	4,44	4,40	4,37
2	3,54	3,33	3,19	3,13	3,08	3,05	3,03	3,01	2,98
4	2,70	2,54	2,43	2,38	2,35	2,32	2,31	2,29	2,27
6	2,20	2,07	1,98	1,94	1,91	1,89	1,88	1,86	1,85
8	1,88	1,78	1,72	1,69	1,67	1,66	1,65	1,64	1,63
12	1,50	1,46	1,43	1,42	1,41	1,40	1,40	1,39	1,39
24	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Anexo V

Valores de «n» por Horton, para ser empleados en la fórmula de Manning.

Cuadro 31. Tabla con coeficientes de rugosidad (n) según Horton

Superficie	Condiciones			
	Perfectas	Buenas	Regulares	Malas
Canales y Zanjas				
a. Canales revestidos con concreto	0,012	0,014*	0,016*	0,018
b. En tierra, alineados y uniformes	0,017	0,020	0,0225	0,025*
c. En roca, lisos y uniformes	0,025	0,030	0,033*	0,035
d. En roca, con salientes y sinuosos	0,035	0,040	0,045	
e. Sinuosos y de escurrimiento lento	0,0225	0,025*	0,0275	0,030
f. Dragados en tierra	0,025	0,0275*	0,030	0,033
g. Con lecho pedregoso y bordes de tierra, enhierbados	0,025	0,030	0,035*	0,040
h. Plantilla de tierra, taludes ásperos	0,028	0,030	0,033	0,035
Corrientes naturales				
1. Limpios, bordes rectos, llanos, sin hendiduras ni charcos profundos	0,025	0,0275	0,030	0,033
2. Igual a 1, pero con algo de hierbas y piedra	0,030	0,033	0,035	0,040
3. Sinuoso, algunos charcos y escollos limpios	0,033	0,035	0,040	0,045
4. Igual a 3, de poco tirante con pendiente y sección menos eficientes	0,040	0,045	0,050	0,055
5. Igual a 3, algo de hierba y piedras	0,035	0,040	0,045	0,050
6. Igual a 4, secciones pedregosas	0,045	0,050	0,055	0,060
7. Ríos perezosos, cauce enhierbado o con charcos profundos	0,050	0,060	0,070	0,080
8. Cauces muy enhierbados	0,075	0,100	0,125	0,150

* Valores corrientemente usados en la práctica.

Extractado de Canales de Desviación; Ciancaglini, N.1986, Argentina, UNESCO.

Agradecimientos

Nuestros más sinceros agradecimientos a todas las personas e instituciones que prestaron su ayuda desinteresada en la realización de este manual. Agradecemos a:

Waldo Canto Vera, CONAF IV Región

Mario Gálvez Fernández, CONAF V Región

Guillermo Navarro Vidal, CONAF VI Región

Luis Carrasco Bravo, CONAF VII Región

Francisco Castillo Espinoza, CONAF VIII Región

Leonardo Román Arellano, Ingeniero Forestal, Universidad de Talca

Cristian Jordán Díaz, Ingeniero Forestal, Universidad de Talca