



INCO-CT2004-510739

EPIC FORCE

Evidence-based Policy for Integrated Control of Forested River Catchments in Extreme Rainfall and Snowmelt

Instrument: Specific Targeted Research Project

Thematic Priority: Specific Measures in Support of International Cooperation, Developing Countries, A.2 Rational Use of Natural resources, A.2.1 Managing humid and semi-humid ecosystems

Deliverable D22

Best practice guidelines for dealing with large woody debris

El control de detritos leñosos y el manejo de la vegetación en el cauce

Authors: Lenzi M.A., Comiti F., Mao L., Andreoli A., Pecorari E., Rigon E., Picco L.

**University of Padova (UNIPD)
Department of Land and Agroforest Environments**

Due date of deliverable: Month 32

Actual submission date: Month 32

Start date of project: 1 February 2005

Duration: 36 months

Organisation name of lead contractor for this deliverable: University of Padova

Revision [final]

| Project co-funded by the European Commission within the Sixth Framework Programme (2002-2006) | | |
|--|---|----------|
| Dissemination Level | | |
| PU | Public | X |
| PP | Restricted to other programme participants (including the Commission Services) | |
| RE | Restricted to a group specified by the consortium (including the Commission Services) | |
| CO | Confidential, only for members of the consortium (including the Commission Services) | |

EPIC FORCE - UNIPD *El control de detritos leñosos y el manejo de la vegetación en el cauce*

Lenzi M.A., Comiti F., Mao L., Andreoli A., Pecorari E., Rigon E., Picco L.

SUMMARY

The document is a guideline for the proper management of in-channel wood (LWD, large woody debris) in urbanised catchments, developed for a ready utilization by river managers. Relevant bibliographic references are reported at the end of each section.

After the first introductory chapter on the topic, the second section presents an overview of wood characteristics, sources, and dynamics in river basins, stressing the related environmental benefits as well as possible flood risks.

The third chapter reports some general descriptions of stream control works, with special focus on open check-dams, under an historical perspective.

The fourth chapter presents in details all the existing typologies of structures for trapping wood in upland streams, starting from check-dams with ramparts, developed for debris flows, moving then to earlier vertical filters and double inclination filters, ending with modern rope-net and cable filters. The different types are often described in conjunction with results gained from experiments on physical models, in particular from Japan, Italy, and Switzerland. Structures for blocking wood in larger, lowland rivers are shown too, reporting about French experience.

Finally, the fifth chapter deals with the relevance and with possible management options of riparian woodlands, which represent source areas of woody debris especially in the lower portion of river basins. Examples of legislations and practices from three Italian regions are also reported, beside operative and economic aspects of wood harvesting in the stream corridor.

EPIC FORCE - UNIPD *El control de detritos leñosos y el manejo de la vegetación en el cauce*

Lenzi M.A., Comiti F., Mao L., Andreoli A., Pecorari E., Rigon E., Picco L.

INDICE GENERAL

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2 | LA MADERA Y LOS DETRITOS LEÑOSOS EN LOS CAUCES | 3 |
| 2.1 | LA TERMINOLOGÍA ANGLOSAJONA LWD | 3 |
| 2.2 | PROPIEDAD FÍSICA DE LA MADERA Y SU IMPLICACIÓN SOBRE EL TRANSPORTE | 4 |
| 2.3 | ORIGEN DE LA MADERA Y DETRITOS LEÑOSOS EN EL CAUCE | 5 |
| 2.4 | TRANSPORTE DE LA MADERA Y DETRITOS LEÑOSOS E INFLUENCIA HIDRODINÁMICA | 7 |
| 2.5 | TIPOLOGÍAS Y DISPOSICIÓN ESPACIAL | 11 |
| 2.6 | INFLUENCIA MORFOLÓGICA | 16 |
| 2.7 | BIBLIOGRAFÍA | 20 |
| 3 | DIQUES PARA LA CORRECCIÓN DE TORRENTES Y DIQUES ABIERTOS | 27 |
| 3.1 | DEFINICIÓN | 27 |
| 3.2 | GENERALIDADES | 27 |
| 3.3 | CLASIFICACIÓN DE LAS OBRAS | 30 |
| 3.4 | DIQUES ABIERTOS O SELECTIVOS | 36 |
| 3.5 | EVOLUCION HISTÓRICA DE LOS DIQUES DE CORRECCIÓN DE TORRENTES E INTRODUCCIÓN DE LOS DIQUES ABIERTOS | 38 |
| 3.6 | MOTIVACIONES QUE IMPULSARON LA CREACIÓN DE LOS DIQUES ABIERTOS | 42 |
| 3.7 | EJEMPLOS DE DIQUES ABIERTOS | 44 |
| | 3.7.1 Diques abiertos en Italia | 48 |
| 3.8 | BIBLIOGRAFÍA | 56 |
| 4. | DIQUES SELECTIVOS Y ESTRUCTURAS EXPERIMENTALES DE RETENCIÓN DE DETRITOS LEÑOSOS | 61 |
| 4.1 | INTRODUCCIÓN | 61 |
| 4.2 | DIQUES CON CONTRAFUERTE | 63 |
| 4.3 | EXPERIENCIA AUSTRICA-ITALIANA: DIQUES CON CONTRAFUERTE Y FILTRO | 66 |
| 4.4 | MODELOS EXPERIMENTALES SOBRE LA EFICIENCIA DE RETENCIÓN DE TRONCOS EN LOS FILTROS | 73 |
| 4.5 | DIQUES-REDES PARA LA RETENCIÓN DE LA MADERA | 78 |
| | 4.5.1 Elementos para el diseño y proyecto de la red | 79 |
| | 4.5.2 Elección de la localización | 81 |
| | 4.5.3 Dimensiones de la red | 83 |
| | 4.5.4 Efectos de captura de sedimentos | 84 |
| | 4.5.5 Dimensionamiento | 86 |
| | 4.5.6 Sugerencias constructivas | 87 |

| | |
|---|------------|
| 4.6 DIQUES CABLEADOS (<i>CABLE DAM</i>) | 89 |
| 4.6.1 Dique cableado sobre el río Sarca (Trento, Italia) | 89 |
| 4.7 EXPERIENCIA JAPONESA | 97 |
| 4.7.1 Experimentación de Ishikawa (1990) | 98 |
| 4.7.2 Primer tipo de experimento para la evaluación de la eficiencia de capture de las obras (1990) | 98 |
| 4.7.3 Eficiencia de retención de los troncos | 104 |
| 4.7.3.1 <i>Eficiencia de retención de las rejas (boom screens)</i> | 104 |
| 4.7.3.2 <i>Eficiencia de captura de los diques de corrección de torrentes clásicos</i> | 106 |
| 4.7.3.3 <i>Eficiencia de captura de los diques abiertos-selectivos</i> | 106 |
| 4.7.4 Segunda tipología de experimentos para la evaluación de la eficiencia de captura de las obras | 106 |
| 4.7.4.1 <i>Resultados experimento A</i> | 111 |
| 4.7.4.2 <i>Resultados experimento B</i> | 112 |
| 4.7.4.3 <i>Resultados experimento C</i> | 113 |
| 4.7.5 Área de depósito de los troncos | 113 |
| 4.8 MODELOS DE OBRAS EN SUIZA | 115 |
| 4.8.1 Modelos experimentales | 118 |
| 4.9 EXPERIENCIA FRANCESA | 124 |
| 4.10 BIBLIOGRAFÍA | 126 |
| | |
| 5 EL MANEJO DE LA VEGETACIÓN EN EL CAUCE | 131 |
| 5.1 VENTAJAS DE LA PRESENCIA DE LA VEGETACIÓN EN EL CAUCE | 132 |
| 5.2 ORDENACIÓN DE LA VEGETACIÓN EN EL CAUCE | 134 |
| 5.3 INTERACCIONES CAUCE-VEGETACIÓN | 136 |
| 5.4 INTRODUCCIÓN DE VEGETACIÓN EN EL CAUCE | 139 |
| 5.5 LA LEGISLACIÓN ITALIANA EN TEMA DE GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS Y OBRAS HIDRÁULICAS | 140 |
| 5.5.1 La transferencia de competencias a las autoridades regionales en materia de recursos hídricos | 142 |
| 5.5.2 La nueva ley sobre la defensa del suelo (n. 183 del 1989) | 143 |
| 5.5.3 Ley n. 37 de 1994 | 144 |
| 5.5.4 La normativa sobre restricciones paisajistas y ambientales | 145 |
| 5.5.5 Vegetación en los cauces y directivas legislativas | 146 |
| 5.6 CRITERIOS INNOVATIVOS PARA LA PROYECTACIÓN Y LA EJECUCIÓN DE LAS INTERVENCIONES EN EL CAUCE | 147 |
| 5.7 LA LEGISLACIÓN SOBRE EL MANEJO DE LA VEGETACIÓN EN EL CAUCE, EN ITALIA Y EN LAS REGIONES | 149 |
| 5.7.1 Región del Veneto | 149 |
| 5.7.2 Región del Trentino Alto-Adige | 151 |
| 5.7.2.1 <i>La Provincia Autónoma de Trento</i> | 151 |
| 5.7.2.2 <i>La Provincia Autónoma e Bolzano</i> | 153 |
| 5.8 LOS PRECIOS DE LA GESTIÓN | 156 |
| 5.9 INTERVENCIONES DE MANUTENCIÓN Y DESBOSQUE DE LA VEGETACIÓN EN EL CAUCE | 157 |
| 5.9.1 Tipologías de vegetación en el cauce | 158 |
| 5.9.2 Tipos de intervenciones | 158 |

Lenzi M.A., Comiti F., Mao L., Andreoli A., Pecorari E., Rigon E., Picco L.

| | |
|---|------------|
| 5.9.3 Accesibilidad al sitio de corte | 159 |
| 5.9.4 La calidad de la madera extraíble | 159 |
| 5.9.5 La cantidad de madera extraíble | 161 |
| 5.9.6 La recogida de material vegetal de los cauces | 161 |
| 5.9.6.1 <i>Los sistemas de trabajo</i> | 163 |
| 5.9.6.2 <i>La recogida no asociada</i> | 165 |
| 5.9.6.3 <i>La recogida asociada</i> | 166 |
| 5.9.6.4 <i>La recogida no integrada</i> | 168 |
| 5.9.6.5 <i>La recogida integrada</i> | 169 |
| 5.10 BIBLIOGRAFÍA | 170 |
| | |
| 6 CONCLUSIONES | 173 |

LISTA DE TABLAS

| | | |
|--------------|--|-----|
| Tabla 3.1 - | Tabla sinóptica de obras de ordenación hidráulica-forestal (obras intensivas). | 31 |
| Tabla 3.2 - | Clasificación de los diques de corrección de torrentes (fuente: AIDI-IILA, 1983). | 33 |
| Tabla 3.3. | Diagrama a bloques recapitulado de las diferentes funciones de un dique. | 36 |
| Tabla 4.1 - | Características del filtro, comportamiento y campo de empleo (Fuente: Ferro y <i>Otros</i> , 2004). | 62 |
| Tabla 4.2 - | Esquema para el diseño y proyecto de la red para la retención de la madera (Rimböck, 2004). | 80 |
| Tabla 4.3 - | Condiciones para la realización de estructuras con redes (Fuente: Rimböck, 2004). | 82 |
| Tabla 4.4 - | Datos de input para el diseño y proyecto (Fuente: Rimbock, 2004). | 82 |
| Tabla 4.5 - | Dimensiones del canal de laboratorio (Fuente: Ishikawa, 1990). | 99 |
| Tabla 4.6 - | Tipología de troncos utilizados por Ishikawa (Fuente: Ishikawa 1990). | 102 |
| Tabla 4.7 - | Descripción de las características de las pruebas de laboratorio (Fuente: Ishikawa, 1990). | 103 |
| Tabla 4.8 - | Parámetros físicos que influyen la eficiencia de captura T (Fuente: Ishikawa, 1990). | 104 |
| Tabla 4.9 - | Efectos de la eficiencia de captura T (Fuente: Ishikawa, 1990). | 105 |
| Tabla 4.10 - | Descripción del canal de laboratorio (Fuente: Ishikawa, 1990). | 106 |
| Tabla 4.11 - | Combinación de troncos y orden de introducción de los mismos (Fuente: Ishikawa, 1990). | 108 |
| Tabla 4.12 - | Tipología de troncos utilizados (Fuente: Ishikawa, 1990). | 109 |
| Tabla 4.13 - | Descripción de las condiciones experimentales (Fuente: Ishikawa, 1990). | 109 |
| Tabla 4.14 - | Área de sobreposición de los troncos retenidos en la zona de sedimentación (Fuente: Ishikawa, 1990). | 114 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|---------------|---|----|
| Figura 2.1 - | <i>Log jam</i> a lo largo del río Fiorentina, Región Veneto, Italia. | 3 |
| Figura 2.2 - | <i>Log step</i> a lo largo del Río Cordon (Italia). | 14 |
| Figura 2.3 - | <i>Log jam</i> a lo largo del Río Code (Italia). | 14 |
| Figura 2.4 - | Estructura base de un <i>bar apex jam</i> (fuente: Abbe y Montgomery, 2003). | 15 |
| Figura 2.5 - | Estructura base de un <i>meander jam</i> (Fuente: Abbe y Montgomery, 2003). | 15 |
| Figura 3.1 - | Dique sobre el torrente Varone (fuente: Ferro y <i>Otros</i> , 2004). | 39 |
| Figura 3.2 - | Obra constituida de un rodapié en cemento armado (Poncet, 1960). | 45 |
| Figura 3.3 - | Dique filtrante denominado a peine o a rastrillo (Genet, 1953). | 46 |
| Figura 3.4 - | Dique con alcantarillas o ventanas múltiples (fuente: AIDI-IILA, 1983). | 49 |
| Figura 3.5 - | Dique abierto a fisura o hendidura (fuente: AIDI-IILA, 1983). | 49 |
| Figura 3.6 - | Dique abierto reticular o con rejas (fuente: AIDI-IILA, 1983). | 50 |
| Figura 3.7 - | Dique tipo rastrillo con piezas verticales (a peine) (fuente: AIDI-IILA, 1983). | 50 |
| Figura 3.8 - | Dique tipo enrejado (fuente: AIDI-IILA, 1983). | 51 |
| Figura 3.9 - | Primer dique a ventana en Italia. | 53 |
| Figura 3.10 - | Dique filtrante a ventana múltiple. | 53 |
| Figura 3.11 - | Dique abierto a ventanas múltiples en el Fiume Isarco (Alto Adige). | 54 |
| Figura 3.12 - | Dique abierto con rejas horizontales (Río Civerton, Trento). | 54 |
| Figura 3.13 - | Dique abierto a rastrillo con piezas verticales en el Torrente Fiorentina (Caprile, Region Veneto). | 55 |
| Figura 3.14 - | Dique a fisura o hendidura (Río Maè, Belluno, Región Veneto). | 55 |
| Figura 4.1 - | Dique con contrafuertes (Fattorelli, 1972), visto desde aguas abajo después del montaje. | 64 |
| Figura 4.2 - | Dique con contrafuertes parcialmente prefabricado con vigas en cemento armado precomprimido, proyectado por Fattorelli (1972). | 64 |
| Figura 4.3 - | Fase de montaje de un elemento prefabricado del dique prefabricado proyectado por Fattorelli (1972), en el tramo final del Río Gasolin; Ziano, Trento, Italia. | 65 |
| Figura 4.4 - | Dique parcialmente prefabricado proyectado por Puglisi (1968), en el Vallone dell’Inferno, tributario del Río Basento; Anzi (Potenza); Región Basilicata, Italia. | 66 |
| Figura 4.5 - | Ejemplo de obra filtrante con un cuneo rompe-colada, visto desde aguas arriba y desde aguas abajo (Fuente: Provincia Autónoma de Trento, 1991). | 67 |
| Figura 4.6 - | Torrente Chieppena; dique filtrante construido en la parte alta de la cuenca en el 1992 (Fuente: Cerato, 1999). | 67 |
| Figura 4.7 - | Dique filtrante con función de detención de la colada detrítica (Torrente Chieppena, Trento), (Fuente: Ferro y <i>Otros</i> , 2004). | 68 |
| Figura 4.8 - | Fase de construcción de un dique filtrante con contrafuertes y filtro en perfiles de acero y elementos dispuestos con doble inclinación visto desde aguas arriba (Río Duron, Italia). | 69 |
| Figura 4.9 - | Dique filtrante en Val Duron antes y después de una crecida (Fuente: Ferro y <i>Otros</i> , 2004). | 69 |
| Figura 4.10 - | Particular de una reja a pendiente variable en un dique abierto realizado en el canal Ahornkar/Wagrain, Austria. | 70 |
| Figura 4.11 - | Dique abierto selectivo a triple inclinación. | 71 |
| Figura 4.12 - | Dique selectivo a triple inclinación (Torrente Fumola, Trento) (Fuente: Degetto, 2000). | 71 |

Lenzi M.A., Comiti F., Mao L., Andreoli A., Pecorari E., Rigon E., Picco L.

| | | |
|---------------|--|-----|
| Figura 4.13 - | Dique filtrante tipo “Genet” dispuesto en el cierre de la plaza de depósito en el Río Taviela, Valle del Noce, Trento, Italia (Fuente: Provincia Autónoma de Trento, 1991). | 72 |
| Figura 4.14 - | Dique selectivo con reja y filtro inclinado (Torrente Isarco, Alto Adige). | 72 |
| Figura 4.15 - | Dique selectivo con filtro inclinado y plaza de depósito aguas arriba (Trento). | 73 |
| Figura 4.16 - | Canal de laboratorio de longitud de 9 metros, utilizado por D’Agostino y Otros (1999) en las experimentaciones sobre la eficiencia de captura de troncos, en diques selectivos con filtro. | 74 |
| Figura 4.17 - | Esquema del dispositivo experimental utilizado por D’Agostino y Otros (2000), para el estudio del comportamiento del material flotante (Fuente: Ferro y Otros, 2004). | 75 |
| Figura 4.18 - | Perfil longitudinal y secciones transversales en la disposición de la red (Rimböck, 2004). | 80 |
| Figura 4.19 - | Campo de utilización de estructuras para la retención de troncos y detritos leñosos (Rimböck, 2004). | 81 |
| Figura 4.20 - | Efectos de la captura de sedimentos (Fuente: Rimbock, 2004). | 85 |
| Figura 4.21 - | Distribución de las cargas en cada cable (Fuente: Rimbock, 2004). | 86 |
| Figura 4.22 - | Distribución de la carga horizontal en cada cable (Fuente: Rimbock, 2004). | 87 |
| Figura 4.23 - | Figura 4.23 – Dique de red después de una colada detrítica (Fuente: GEOBRUGG, 2006). | 88 |
| Figura 4.24 - | Esquema estructural de una red-dique selectivo (Fuente: Gagoshidze, 1969). | 89 |
| Figura 4.25 - | Dique abierto cableado en el río Sarca (Bocenago-Italia). | 90 |
| Figura 4.26 - | Contrafuerte central del dique cableado en el T. Sarca (Bocenago-Italia). | 90 |
| Figura 4.27 - | Dique cableado y umbral de fondo visto desde aguas abajo, T. Sarca (Bocenago-Italia). | 91 |
| Figura 4.28 - | Dique cableado en el Río Sarca, visto desde aguas abajo (Ponte delle Sarche-Italia). | 94 |
| Figura 4.29 - | Dique cableado en el Río Sarca, visto desde aguas arriba (Ponte delle Sarche-Italia). | 94 |
| Figura 4.30 - | Dique cableado durante la fase de construcción (Ponte delle Sarche-Italia). | 95 |
| Figura 4.31 - | Contrafuerte central del dique cableado (Ponte delle Sarche-Italia). | 95 |
| Figura 4.32 - | Anclajes laterales de los cables en la pared rocosa (Ponte delle Sarche-Italia). | 96 |
| Figura 4.33 - | Túnel lateral excavado en roca en la margen derecha para el mantenimiento de la estructura (Ponte delle Sarche-Italia). | 96 |
| Figura 4.34 - | Evento desastroso en el Japón (Shirakawa River, Takamori-cho, Kumamoto, mayo 1988; Fuente: Ishikawa, 1990). | 97 |
| Figura 4.35 - | Configuración del canal de laboratorio (Fuente: Ishikawa, 1990). | 99 |
| Figura 4.36 - | Comportamiento del dique de corrección de torrentes clásico (Fuente: Ishikawa, 1990). | 100 |
| Figura 4.37 - | Disposición del dique con contradique y posible aplicación de rejas (elementos reticulares) en acero (Fuente: Ishikawa, 1990). | 100 |
| Figura 4.38 - | Disposición de las aberturas del dique selectivo (Fuente: Ishikawa, 1990). | 101 |
| Figura 4.39 - | Zona de depósito y tipologías de rejas empleadas por Ishikawa (Fuente: Ishikawa, 1990). | 101 |
| Figura 4.40 - | Disposición y características del canal (Fuente: Ishikawa, 1990). | 107 |
| Figura 4.41 - | Descripción de los tipos de rejas utilizados (Fuente: Ishikawa, 1990). | 110 |
| Figura 4.42 - | Dique a fisura sobre el torrente Sigetsbach (Cantón Obwalden) (Bezzola y Otros, 2004). | 116 |
| Figura 4.43 - | Obra para la retención de la madera utilizada en proximidad de un dique ya existente en el torrente Edisriedbach cerca de Sachseln (Cantón Obwalden) (Bezzola y Otros, 2004). | 116 |
| Figura 4.44 - | Separación de los detritos leñosos a causa de la “backwater” o sea de la | 117 |

Lenzi M.A., Comiti F., Mao L., Andreoli A., Pecorari E., Rigon E., Picco L.

curva de remanso y del embalse que se crea aguas arriba de la acumulación del material flotante; a) funcionamiento en condiciones de crecida considerando caudales máximos; b) funcionamiento durante la fase final de la crecida, (Bezzola y Otros, 2004).

| | | |
|---------------|--|-----|
| Figura 4.45 - | Esquema de un proyecto de <i>Downflow baffle</i> , (Bezzola y Otros, 2004). | 117 |
| Figura 4.46 - | Condiciones de funcionamiento en correspondencia del “ <i>Downflow baffle</i> ”; a) Descarga libre en correspondencia de la abertura de fondo situada en la parte inferior del dique; b) Abertura y borde inferior obstruido por la acumulación de sedimentos, la cual ocupa todo el paramento de aguas arriba del dique (Fuente: Bezzola y Otros, 2004). | 118 |
| Figura 4.47 - | Modelos en escala real (cantón Luzern) (http://www.vaw.ethz.ch). | 119 |
| Figura 4.48 - | Modelo físico para el estudio de la retención de la madera del río Enziwigger (cantón Luzern) (http://www.vaw.ethz.ch). | 119 |
| Figura 4.49 - | Estructura <i>trash rack</i> para la retención del material leñoso en el torrente Dorfbach cerca Sachseln (Cantón Obwalden, Suiza), (http://www.vaw.ethz.ch). | 120 |
| Figura 4.50 - | Modelo físico de laboratorio para el estudio de la retención de detritos leñosos por parte de una <i>trash rack</i> en el torrente Dorfbach (Cantón Obwalden, Suiza) (http://www.vaw.ethz.ch). | 121 |
| Figura 4.51 - | Combinación de dispositivos para la retención de la madera en el río Gurbe (<i>trashrack</i> y <i>downflow baffle</i>) (http://www.vaw.ethz.ch). | 122 |
| Figura 4.52 - | Ejemplo de estructuras para la retención de material flotante (Cantón di Zurigo) (Fuente: Moulin y Piegay, 2004). | 122 |
| Figura 4.53 - | Esquema de <i>trash rack</i> (Hergiswil, Río Steinibach, Suiza) (http://www.vaw.ethz.ch). | 123 |
| Figura 4.54 - | Modelo físico para el estudio de la retención de la madera (Hergiswil, Suiza) (http://www.vaw.ethz.ch). | 123 |
| Figura 4.55- | Modelo físico de un canal para el estudio de la retención de la madera, (Hergiswil, Suiza) (http://www.vaw.ethz.ch). | 124 |
| Figura 4.56 - | Ejemplos de intervenciones destinadas a la retención de detritos flotantes en el Río Adour: (a) redes, (b) barreras flotantes (Fuente: Moulin y Piegay, 2004) . | 125 |
| Figura 4.57 - | Vista del puente de Montmélian en 2001 (Fuente: Moulin y Piegay, 2004). | 125 |
| Figura 5.1 - | Interacciones cauce – vegetación (Fuente: Región Lazio, 2002). | 137 |
| Figura 5.2 - | Efectos de la vegetación sobre la corriente (Fuente: Región Toscana, 2001). | 138 |
| Figura 5.3 - | Procedimiento para la solicitud de cortas de vegetación en los cauces. | 150 |
| Figura 5.4 - | Recogida de biomasa leñosa de un cauce (Fuente: Spinelli, 2005). | 162 |
| Figura 5.5 - | Recogida de biomasa leñosa (Fuente: Spinelli, 2005). | 163 |
| Figura 5.6 - | Acumulación por separado de madera de calidad y material destinado a producción de conglomerado (Fuente: Spinelli, 2005). | 164 |
| Figura 5.7 - | Esquemas de recogida de biomasa leñosa (Fuente: Spinelli, 2005). | 164 |
| Figura 5.8 - | Acumulación de materiales leñosos de calidad en el Fiume Piave (Ponte di Piave, marzo 2003). | 166 |
| Figura 5.9 - | Acumulación y extracción de madera de calidad (Ponte di Piave, marzo 2003). | 168 |
| Figura 5.10 - | Acumulación desordenada de madera (Ponte di Piave, marzo 2003). | 169 |

EPIC FORCE - UNIPD *El control de detritos leñosos y el manejo de la vegetación en el cauce*

Lenzi M.A., Comiti F., Mao L., Andreoli A., Pecorari E., Rigon E., Picco L.

1 INTRODUCCIÓN

La influencia de la madera y de los detritos leñosos sobre la componente geomorfológica de los cursos de aguas constituye un aspecto que ha sido descuidado por mucho tiempo y solo recientemente se han empezado a analizar los efectos que pueden causar las acumulaciones leñosas en los colectores. El continuo aumento de las superficies de los bosques por el abandono de las praderas y de los territorios montanos que una vez eran labrados y cultivados, ha hecho que en toda Europa crezca la atención hacia el estudio del fenómeno del material leñoso y sus implicaciones sobre los cursos de agua. Los detritos leñosos y la vegetación en el cauce influyen sobre varios aspectos de los cursos de agua: hidráulico, morfológico y ecológico.

En la presente guía se ha intentado redactar una clasificación homogénea con la finalidad de describir las tipologías del material leñoso en el cauce y sus agregaciones. La denominación más común y más usada, es seguramente la de *Large Woody Debris* (LWD) con la cual se entiende todo el material leñoso muerto (troncos, ramas, raíces), cuyo diámetro medio es mayor de 10 cm y la longitud superior a 1 m. Para describir el material leñoso más fino se usa el término de *Fine Woody Debris* (FWD). Estos últimos, justamente por sus dimensiones, asumen una importancia menor respecto de los LWD sobre la modificación de las características morfológicas-hidráulicas de los cursos de agua.

Objetivo de esta guía técnica es el de brindar un panorama de las diferentes tipologías de obras de corrección de torrentes y en este contexto enmarcar los diques de tipo filtrante y selectivo mayormente utilizados en el control torrencial de cuencas de montaña. Sucesivamente, la guía ofrece una síntesis ya sea de los principales tipos de diques selectivos utilizados para el control de detritos leñosos, como así también de las principales y más recientes experiencias llevadas a cabo en este sector en Suiza, Austria, Japón e Italia.

Particular énfasis ha sido puesto en los temas de la gestión y del mantenimiento ordinario y extraordinario de la vegetación en el cauce, considerando las experiencias incipientes que se están desarrollando en la Región del Veneto y en las Provincias Autónomas de Trento y Bolzano, teniendo en cuenta la Legislación y las Normas vigentes en Italia relacionadas con el tema.

Se resalta de este modo el rol del enfoque integral de los sistemas fluviales y la relevante importancia que ellos revisten a nivel ecosistémico, consolidando al mismo tiempo el concepto de compatibilidad y coexistencia de las exigencias de salvaguardar y conservar el ambiente con las necesidades de eficiencia hidráulica de la red hídrica y de seguridad del territorio circunstante.

2 LA MADERA Y LOS DETRITOS LEÑOSOS EN LOS CAUCES

2.1 LA TERMINOLOGÍA ANGLOSAJOA LWD

La madera dentro del cauce de los ríos ha causado siempre modificaciones, sea de tipo morfológico como de tipo ecológico-ambiental. En los últimos años, gracias al creciente interés hacia este fenómeno, se ha intentado redactar una clasificación homogénea que pudiese describir las tipologías de las maderas en el cauce y sus agregaciones.

La denominación más común y más usada, es seguramente la de *Large Woody Debris* (LWD) con la cual se entiende todo el material leñoso muerto (troncos, ramas, raíces) cuyo diámetro medio sea mayor a 10 cm y la longitud superior a 1m. Para describir el material leñoso más fino se usa el termino de *Fine Woody Debris* (FWD). Estos últimos, justamente por sus dimensiones, asumen una importancia menor respecto de los LWD sobre las modificaciones de las características morfológicas-hidráulicas de los cursos de agua. Para indicar en cambio una serie de troncos encastrados entre ellos que tienden a formar grandes acumulaciones leñosas, se usa el termino de *log jams* (Fig. 2.1). La descripción de éstas ha sido afrontada por muchos estudiosos, que han asignado nombres específicos a los diferentes tipos de acumulaciones según las dimensiones, forma y origen como se verá especificado a continuación.



Figura 2.1 - *Log jam* a lo largo del río Fiorentina, Región Veneto, Italia.

2.2 PROPIEDAD FÍSICA DE LA MADERA Y SU IMPLICACIÓN SOBRE EL TRANSPORTE

La física del transporte de la madera es diferente a la del sedimento a causa de las diferencias de forma, de densidad, de volúmenes movilizados y de las modalidades de abastecimiento del material desde las vertientes al cauce y en el cauce mismo.

El volumen de masa de la madera, entendida como sustancia privada de poros, es cerca 1519 Kg m⁻³. La madera es por tanto más pesada que el agua (1000 kg m⁻³) y flota porque en el interior de los lumos celulares está presente el aire. La madera tiene por lo tanto un volumen de masa efectiva menor que la del agua y variable entre 300-900 kg m⁻³ por lo cual flota hasta el tirante correspondiente con el pelo libre.

La madera es un material de elevada higroscopicidad, entendiendo esta como la capacidad de absorber humedad de la atmósfera y del ambiente que le rodea y de retenerla bajo forma de agua líquida o de vapor de agua. La higroscopicidad es una propiedad importante dado que la humedad retenida de la madera influencia muchas propiedades tecnológicas del material (Giordano, 1976).

La madera depositada en el cauce (pero no perennemente sumergida) está expuesta a una atmósfera rica de vapor de agua y por tanto continuamente absorbe o cede humedad a través de la superficie. Las variaciones de la humedad tienden a influenciar las características mecánicas de la madera. El módulo de elasticidad aumenta para valores de humedad entre 0 y 3 %, mientras tiende a disminuir para valores superiores, hasta llegar al 70 % del valor máximo en condiciones de inhibición. La resistencia a compresión asume el valor máximo en el estado anhidro y el valor mínimo para contenidos de humedad iguales o inferiores al punto de saturación de las paredes celulares. También la resistencia a tracción disminuye al aumentar la humedad de la madera, pero en menor medida respecto a la resistencia a la compresión. Por cuanto concierne la resistencia a flexión, se observa una disminución lineal en los intervalos de humedad 5-8 % y 15-20 %. Por último, también la resistencia a la penetración disminuye al aumentar el contenido de humedad (Giordano, 1976).

La alternancia de excursiones térmicas y de tasas de humedad provoca continuos hinchazones y deshinchazones de los tejidos leñosos que tienden lentamente a desfibrarse y fisurarse sobre la superficie externa, provocando una notable disminución de las propiedades

mecánicas y un progresivo deterioramiento. La prolongada inmersión de la madera en agua provoca la casi total saturación con el consiguiente empeoramiento (a igualdad del estado de degradación) de las propiedades mecánicas en virtud de cuanto precedentemente citado. La madera saturada de agua, en resumidas cuentas, no flota.

Es el caso muy típico de un tronco de longitud superior a la anchura del colector, que viene bloqueado transversalmente sobre el cauce; si el tirante no es lo suficientemente elevado y la granulometría del cauce del torrente emerge del pelo libre de la corriente, se crea una situación favorable de bloqueo no solo de los troncos, sino también de todo el material vegetal (ramas, cepas, etc.). Como consecuencia de las dilataciones, desfibramientos, fisuraciones, de las numerosas micro y macro fracturas ocasionadas durante la caída del tronco, de las cargas hidrodinámicas repetidas y de los choques, la resistencia mecánica de la madera disminuye drásticamente. El empuje hidrodinámico que actúa sobre los troncos dispuestos transversalmente es a menudo, también para pequeños eventos de crecida, suficiente para superar el límite elástico-plástico de la madera y, por tanto, en grado de romper el tronco en pequeños trozos que serán a continuación transportados por la corriente (Degetto, 2000).

La rotura de la madera, y por tanto su disminución en longitud, no es casual, pero se puede pensar en alguna relación con la anchura del cauce: la madera continuará a bloquearse y a partirse en partes más pequeñas hasta que no alcance una longitud mínima que le permita defluir a lo largo del colector.

2.3 ORIGEN DE LA MADERA Y DETRITOS LEÑOSOS EN EL CAUCE

El origen del abastecimiento y la cantidad de madera que es almacenada en un colector puede ser usado como indicio para poder definir las variaciones sea de naturaleza morfológica, sea de naturaleza hidráulica, que los detritos leñosos pueden imponer al canal. En colectores alimentados por grandes cantidades de detritos, deberíamos por tanto esperar manifestaciones variadas y diferentes en relación a las características del transporte sólido y del dinamismo morfológico, respecto a canales en los cuales la presencia de la madera y de los detritos leñosos es menor. La cantidad y el tipo de madera reclutada en el canal principal dependen de las características del bosque que lo alimenta (ej.: densidad, edad, estado fisiológico, etc.) y de los procesos que regulan la introducción de los detritos al interior del cauce.

Los factores que directamente o indirectamente llevan madera al interior del cauce cambian según el territorio, pero en general incluyen procesos biológicos (insectos, y enfermedades fúngicas que causan la muerte de plantas adyacentes al cauce), no biológicos (incendios en los bosques, coladas detríticas, desprendimientos, viento, nieve), y el impacto antrópico de los trabajos silviculturales en el bosque. Estos fenómenos influyen en el diámetro, en la longitud, en la edad y en la especie de la madera presente en el interior de un curso de agua.

Las variables que mayormente influyen sobre el origen y la cantidad de material leñoso en el interior del cauce pueden ser de naturaleza espacial o temporal.

Por cuanto concierne a la componente espacial, el origen y la cantidad de madera presente en el curso del agua varía en función del orden del colector. En los torrentes de primer y segundo orden la mayor parte del material proviene de fenómenos de inestabilidad de las vertientes (desprendimientos) y de coladas detríticas, mientras que en ríos de orden superior, el factor primario de reclutamiento de los árboles es la erosión en las orillas que tienden a hacer caer al interior de los ríos árboles que antes eran estables (Grant y Swanson, 1995; Johnson y *Otros*, 2000). Del mismo modo, en los colectores de primer y segundo orden la cantidad de material leñoso en los cauces es mayor respecto a aquellos de orden superior y va a influenciar en modo dominante la morfología del mismo cauce (Nakamura y Swanson, 1993). Según Ishikawa (1990), la mayor parte del sedimento y de la madera en una cuenca hidrográfica viene abastecida de cauces con pendiente superior al 15% y el caudal de la madera varía mucho al variar la cuenca hidrográfica y el colector, también al variar de los caudales sólidos.

Por cuanto concierne la escala temporal, el origen de la madera flotante puede ser subdividida en tres categorías diferentes (Pecorari, 2003):

- Largo plazo (en el orden de 100-200 años);
- Medio plazo (en el orden de 10-20 años);
- Breve plazo (en el orden de días).

La mortalidad natural de los árboles, coayudada por el efecto del viento, provee la regular producción de material leñoso que, siendo caracterizado por una particular escala temporal, puede ser definida a largo plazo. La frecuencia con que se verifican intromisiones de tipo

crónico, varía en función de la tipología y del tipo de tratamiento silvicultural y de gobierno de los bosques que se encuentran en los alrededores del río.

La producción de material leñoso a *medio plazo* tiene origen principalmente en la erosión de las orillas. Éstas tienden a aumentar en modo significativo la cantidad de madera que se introduce en el colector, en relación a la muerte natural de las plantas. La tasa de erosión de las orillas tiene gran influencia especialmente en grandes ríos. También el hielo puede dar origen a socavones y a la intromisión de troncos en el cauce, sobretodo allí donde el proceso erosivo había ya debilitado los terrenos en los cuales se alojaba el aparato radical. Las causas que originan eventos a breve plazo están ligadas a eventos extremos, como riadas, coladas detríticas, desprendimientos e incendios en bosques que pueden alimentar en modo puntual y con grandes cantidades de material leñoso un curso de agua.

En conclusión, la suma de la cantidad de madera y de detritos leñosos presente en un tramo de un cauce representa un equilibrio entre las aportaciones de las vertientes u orillas, la pérdida por transporte hacia el valle, y la fragmentación y degradación del material leñoso. Substancialmente, la parte más relevante en la producción de material leñoso presente en el cauce toma origen en eventos catastróficos, de grandes movimientos de tierra, o de eventos de crecida.

2.4 TRANSPORTE DE LA MADERA Y DETRITOS LEÑOSOS E INFLUENCIA HIDRODINÁMICA

La caracterización de la mecánica del fenómeno del transporte del material leñoso a lo largo de un cuerpo de agua es de fundamental importancia para poder entender como éste influenciará la dinámica y la morfología del cauce. La tipología del movimiento está en relación con dos factores hidráulicos que tienden a hacerlo variar: el calado hidráulico en el colector y la densidad relativa de la madera que es definida como la relación entre la densidad de la madera y aquella del fluido en el cual está inmerso. De eso deriva que el transporte de madera depende del tipo de evento que lo moviliza: flujo exclusivamente líquido, transporte sólido ordinario, transporte sólido hiperconcentrado y colada detrítica.

En el caso ordinario, y por lo tanto en el caso de prevalencia de flujo líquido, el transporte de la madera y del material vegetal (ramas, raíces, cepas), en relación al grado de intromisión en agua, puede ocurrir de tres formas diferentes (Degetto, 2000):

- por arrastre y rodadura en el fondo: el material se desplaza rodando o arrastrando sobre el fondo empujado por la corriente. Esto se verifica cuando el tirante hidráulico es menor del diámetro de la madera ($h/D_{log} < 1$) o también cuando la fuerza peso y de fricción supera la capacidad de carga;
- en suspensión en la corriente: el material se mueve inmerso en el agua evitando el contacto con el fondo y con el pelo libre. Eso sucede para un tirante hidráulico mayor del diámetro del tronco ($h/D_{log} > 1$) y una densidad de la madera próxima a aquella del agua;
- por fluctuación y flotabilidad: esto se verifica cuando el tirante hidráulico es próximo o mayor del diámetro de la madera ($h/D_{log} \geq 1$) y la densidad de la madera es inferior a aquella del agua; de tal modo que la fuerza flotante prevalece netamente sobre la fuerza peso. Esto representa el movimiento más común para la madera.

Relativamente al estudio en campo del movimiento de los troncos flotantes, o *Floating Woody Debris* (FWD), no han sido aún realizadas búsquedas exhaustivas. En literatura es difícil encontrar estudios que traten de un modo claro y conciso la descripción del fenómeno. Algunos investigadores han llegado a la conclusión que los troncos siguen la línea de thalweg del río (Chang y Shen, 1979; Diehl, 1997). Diehl (1997) también ha observado que la madera es transportada sobretodo como troncos individuales.

La falta de observación en campo es una carencia importante en el estudio de la dinámica de los troncos y la única certeza está dada por el hecho que seguramente el transporte de ellos depende de su dimensión, de la morfología del colector y de sus características hidráulicas e hidrológicas (Pecorari, 2003).

Braudick y Grant (2001) han desarrollado un modelo semi-cuantitativo basado en las características geométricas de los troncos y geomorfológicas del curso del agua. Partiendo de la observación de diferentes casos reales, los autores individúan tres tamaños característicos del canal (anchura, sinuosidad y tirante hidráulico) y dos características del material leñoso transportado por la corriente (longitud y diámetro) capaces de influenciar el depósito. Naturalmente, también las características físicas del tronco pueden tener una influencia no desdeñable, como por ejemplo la presencia de la cepa sobre el tronco que ocasiona un

movimiento más dificultoso y al mismo tiempo puede modificar el movimiento del otro tronco con el cual interacciona.

La finalidad es aquella de obtener tres relaciones adimensionales extraídas de estas características del río y de los troncos, que describen la posibilidad de la madera de ser depositada.

Estas tres relaciones son:

$$\frac{L_{\log}}{W_{av}} \quad \frac{L_{\log}}{R_c} \quad \frac{d_b}{d_{av}} \quad (2.1)$$

en la cual L_{\log} es la longitud del tronco, W_{av} es la anchura del canal, R_c es el radio de curvatura medio del canal, d es la profundidad de flotación y d_{av} es el tirante medio del canal.

La capacidad de depósito de los detritos leñosos (DR), como la definen Braudrick y Grant (2001), es expresada proporcionalmente por la siguiente relación:

$$DR \propto \left(a_1 \frac{L_{\log}}{W_{av}} + a_2 \frac{L_{\log}}{R_c} + a_3 \frac{d_b}{d_{av}} \right) \quad (2.2)$$

en la cual a_1 , a_2 , y a_3 son coeficientes que varían en función de la importancia de las tres variables adimensionales.

Las principales limitaciones de este método recaen en el hecho que la relación 2.2 se basa en los valores medios de los parámetros involucrados, ya que condiciones locales pueden a veces resultar más significativas de aquellas medias en favorecer el depósito de material. Estudios dirigidos a evaluar la interacción de la corriente con el material transportado muestran como este actúa de elemento de rugosidad añadida que tiende a hacer disminuir la velocidad y elevar el tirante hidráulico.

Diferentes estudios han buscado evaluar los esfuerzos tangenciales (y por tanto las disipaciones energéticas) causadas por la presencia de troncos en el cauce. No obstante, a parte Bocchiola y Otros (2002) que estudian la influencia de una acumulación de troncos flotantes parangonándola a una placa rugosa flotante en el cauce, el efecto disipador ha sido evaluado para la madera en condición estática.

Un ejemplo de cómo la distribución de los esfuerzos tangenciales sea alterada por la presencia de troncos en el cauce, es brindado por Manga y Kichner (2000) los cuales,

desdeñando otras variables (sinuosidad, forma de fondo, etc.), analizan como el *Large Woody Debris* influencia la partición del esfuerzo total dado por la siguiente ecuación:

$$\tau_0 = \rho g R S \quad (2.3)$$

en donde, la componente ρ es la densidad del agua, g la aceleración de gravedad, R el radio hidráulico y S la pendiente de la línea de la energía.

Según Einstein y Bancks (1950), para una corriente en movimiento uniforme, la tensión total puede ser dividida según diferentes componentes cada una de las cuales caracteriza un particular elemento de rugosidad:

$$\tau_0 = \tau_{GS} + \tau_{BF} + \tau_{LWD} + \tau_{others} \quad (2.4)$$

La componente τ_{GS} es la tensión efectiva que se verifica sobre el lecho, τ_{BF} es la componente debida a la forma de fondo, τ_{others} otras causas de resistencia al movimiento (ej. sinuosidad) y τ_{LWD} es la tensión debida a la madera.

Manga y Kirchner (2000), efectuando mediciones en laboratorio, han estimado la influencia de esta última componente sobre la tensión tangencial y evaluado el coeficiente de resistencia C_D (*drag*) sumergiendo un objeto en un flujo uniforme con velocidad media U . La fuerza por unidad de área sobre este objeto será función de la fuerza de arrastre F (*drag*):

$$\tau_{LWD} = \frac{F}{A} = \frac{1}{2} \rho C_D U^2 \quad (2.5)$$

en donde, la componente A es el área de la sección del objeto perpendicular al flujo, ρ y U son la densidad y la velocidad de fluido y C_D el coeficiente de resistencia hidrodinámica que puede depender de diferentes factores (número de Reynolds, número de Froude, forma del objeto y orientación del mismo). El valor de C_D ha sido estudiado en los siguientes casos: tipos diferente de vegetación, forma de fondo y partículas de diferentes dimensiones. Para tener un término de confrontación ha sido considerado también el caso de un cilindro de diámetro comparable a la profundidad del canal, caso ya analizado en el pasado (Batchelor, 1976). Como resultado Manga y Kirchner obtienen un valor que se aleja del valor esperado, definido valor aparente del coeficiente *drag* e igual a:

$$C_D^{app} \approx \frac{C_D}{(1-B)^2} \quad (2.6)$$

la componente B viene llamada “*blockage*” y manifiesta la relación entre el área obstruida del trozo de madera y el área total de la sección perpendicular al flujo. Teniendo cuenta de esto, el valor medio del esfuerzo tangencial τ_{LWD} (fuerza resistente general de LWD dividido el área del cauce) resulta ser:

$$\tau_{LWD} = \rho C_D^{app} \frac{H}{2L} U^2 \quad (2.7)$$

función por tanto de la relación H/L , con L la distancia entre los troncos y H el diámetro medio de los mismos. H/L representa la densidad de los detritos leñosos: creciendo esta última, aumenta el tirante y por tanto el esfuerzo tangencial total τ_0 . A pesar de esto, τ_{LWD} aumenta más rápidamente y por tanto hay una neta disminución de la fuerza tangencial disponible en el fondo en presencia de los detritos arbóreos.

2.5 TIPOLOGÍAS Y DISPOSICIÓN ESPACIAL

En literatura hay varias denominaciones para describir el material leñoso en el cauce y su disposición espacial. La madera puede estar presente dentro del cauce sea como un único trozo disperso (*log*) sea como una acumulación (*log jam*). Con el término *log jam* se indica un depósito de material vegetal muerto con diámetro no desdeñable (superior a 5 cm) y de tamaño variable.

Comúnmente, el tronco que se deposita en el cauce o a lo largo de las orillas tiende a colocarse según la dirección del flujo de la corriente. Si el tronco posee aún el aparato radical entonces las raíces tienden a colocarse hacia aguas arriba.

Las características de la madera y aquellas del colector son las principales responsables de la frecuencia y de la tipología de las acumulaciones. Longitud y diámetro de los troncos relacionados con anchura y tirante del curso de agua y la presencia de las llamadas “*piezas claves*” (*key pieces*) son los factores que determinan la tipología de las acumulaciones leñosas en el cauce.

También la especie arbórea influencia el movimiento de la madera y el tipo de acumulación que pueda generar. En efecto las especies deciduas están caracterizadas por tener muchas ramas que dificultan su transporte y facilitan la formación de *log jams* porque tienden a captar otros residuos leñosos más pequeños. Al contrario de las coníferas, que una vez caídas

al canal, tienden a formar piezas cilíndricas, las cuales son fácilmente transportables por la corriente y, por lo tanto, crearán más difícilmente acumulaciones (Montgomery y Otros, 2003).

Los modelos estructurales de agregaciones de las acumulaciones varían sistemáticamente al variar la dimensión del curso de agua considerado (Abbe y Otros, 1993; Nakamura y Swanson, 1993) y a menudo la acumulación de madera en colectores de primer y segundo orden aparece caótica o casual. En cauces más anchos de orden superior donde los troncos tienen más movilidad, las acumulaciones parecen más organizadas y pueden ser clasificadas en los diferentes tipos de *log jams* (Abbe y Montgomery, 1996, 2003; D'Agostino, 1999).

La clasificación redactada por Abbe y Montgomery (1996) prevé la siguiente estructura generada por los troncos en el cauce:

- *logs steps*. Particulares depósitos sobre el cauce que se forman, sobre torrentes con una anchura de la orilla (*bankfull*) limitada (menor de 15m). Están caracterizados por la presencia de uno o dos componentes, netamente transversales al flujo de la corriente, encajadas a las orillas y al fondo: se forma así una estructura a peldaño similar a aquella de los *steps-pools* también por cuanto concierne a la altura y al espacio entre los steps (Wohl y Otros, 1997). La estructura creada puede retener y capturar una gran cantidad de sedimentos aguas arriba y disipar parte de la energía de la corriente por medio de la formación de pozas (*pools*) aguas abajo de los *log step* (Fig. 2.2);
- *log dams* o diques de material vegetal. Cuando los troncos, transportados durante un evento de riada, asumen longitudes muy próximas a la anchura del lecho del colector, tienden a bloquearse a causa de la morfología del cauce. Por consiguiente, se forman verdaderos diques que resisten hasta que se mantiene una cierta fricción entre los troncos. Estos grandes depósitos provocan una disminución de la corriente aguas arriba, induciendo un progresivo aumento del material constituyente el *log dam* y la deposición de sedimentos (Fig. 2.3). La rotura de repente del bloqueo puede generar frentes de onda de tipo impulsivo (*dambreak*) y coladas detríticas;
- *bar top jams* (BTJ): son acumulaciones casuales de madera con elementos también verticales que se forman sobre la parte más elevada de una barra (parte mediana)

durante la fase decreciente de una riada. Los elementos que forman tal estructura están orientados en todas direcciones, pero la mayor parte resulta ser oblicua a la dirección del flujo de la corriente. Estas estructuras son relativamente inestables y tienden a ser depositadas a lo largo de las orillas si vienen movilizadas. Tienen un pequeño efecto sobre la morfología del colector;

- *bar apex jams* (BAJ): se forman en el cauce a la cabeza (o ápice) de la barra. Son estructuras mucho más estables, que tienen una arquitectura caracterizada por un elemento clave, paralelo a la dirección de la corriente, elementos ortogonales a la corriente y elementos oblicuos orientados a 10°-30° con la dirección de la corriente (Fig. 2.4). El elemento clave puede ser un tronco grande con el aparato radical dispuesto hacia aguas arriba. La presencia de este elemento reduce la anchura efectiva del cauce y favorece la captura del material vegetal, reduciendo posteriormente la sección del flujo. Generalmente los elementos ortogonales a la dirección de la corriente se encuentran en la zona del aparato radical, donde impactan y vienen englobados sobre el mismo por la corriente; a lo largo del tronco, en cambio, se depositan elementos en posición oblicua. La formación de esta estructura introduce un control local del movimiento hidráulico que origina un fenómeno de modificación de la morfología del cauce;
- *meander jams* (MJ): son las estables y comunes formas de depósito que se verifican al aumentar la dimensión (anchura) del cauce. Al contrario de las BAJ, las MJ tienen dos elementos principales característicos: los “elementos claves” y los “elementos capturados”. Tenemos dos o más elementos claves que inicialmente se depositan a lo largo de las orillas y que son orientados paralelamente a la dirección del flujo (Fig. 2.5). Estos elementos claves están generalmente dotados de un aparato radical dirigido hacia aguas arriba. Los elementos capturados, de dimensiones variables, se acumulan en la zona del aparato radical de los elementos claves y forman estructuras tridimensionales de grandes dimensiones que se depositan lateralmente o encima de los elementos claves. Tales estructuras “arman” la parte cóncava de la orilla interna del meandro y permiten establecer manchas de vegetación situadas detrás que dependen de la dimensión de la estructura;



Figura 2.2 - Log step a lo largo del Río Cordon (Italia).

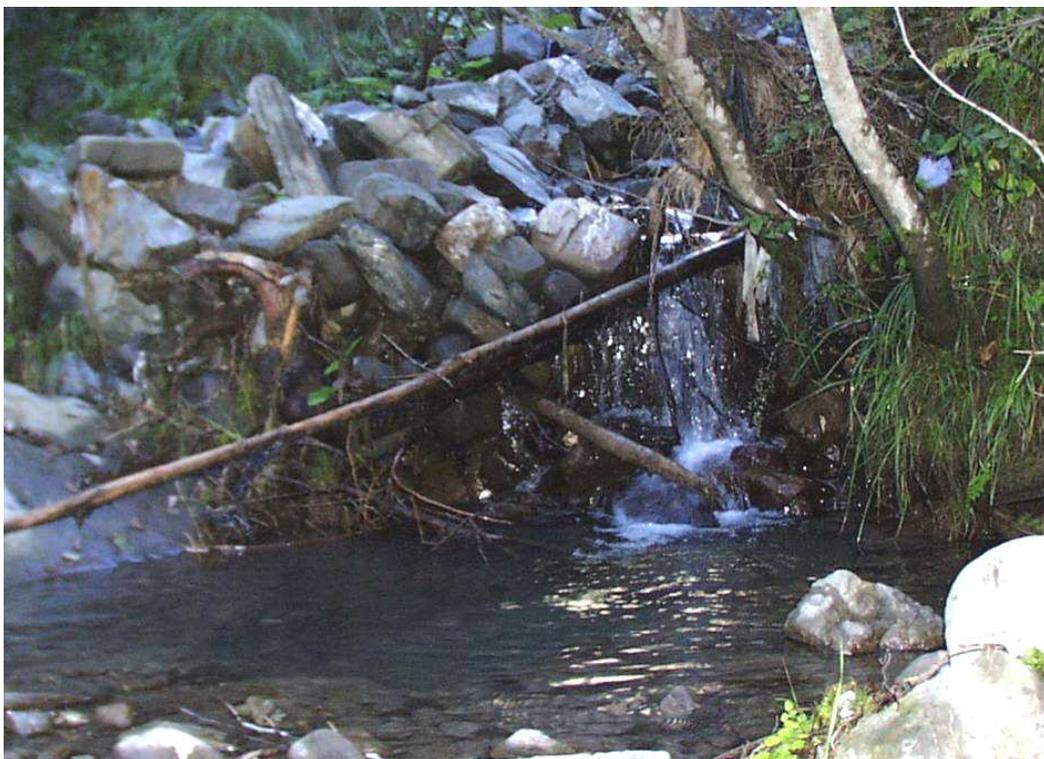


Figura 2.3 - Log jam a lo largo del Río Code (Italia).

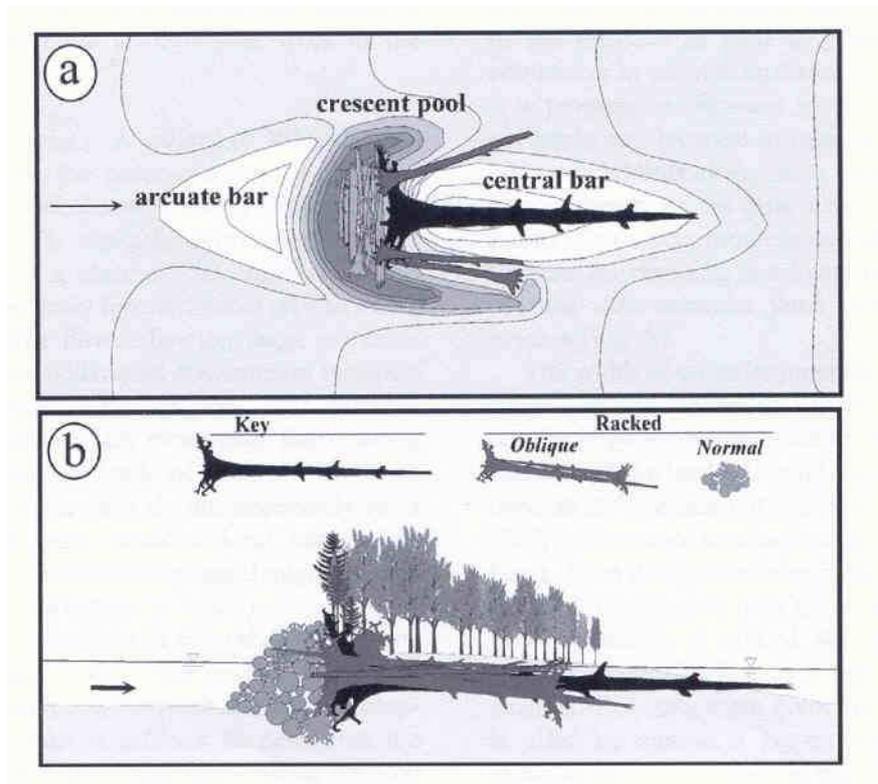


Figura 2.4 - Estructura base de un *bar apex jam* (fuente: Abbe y Montgomery, 2003).

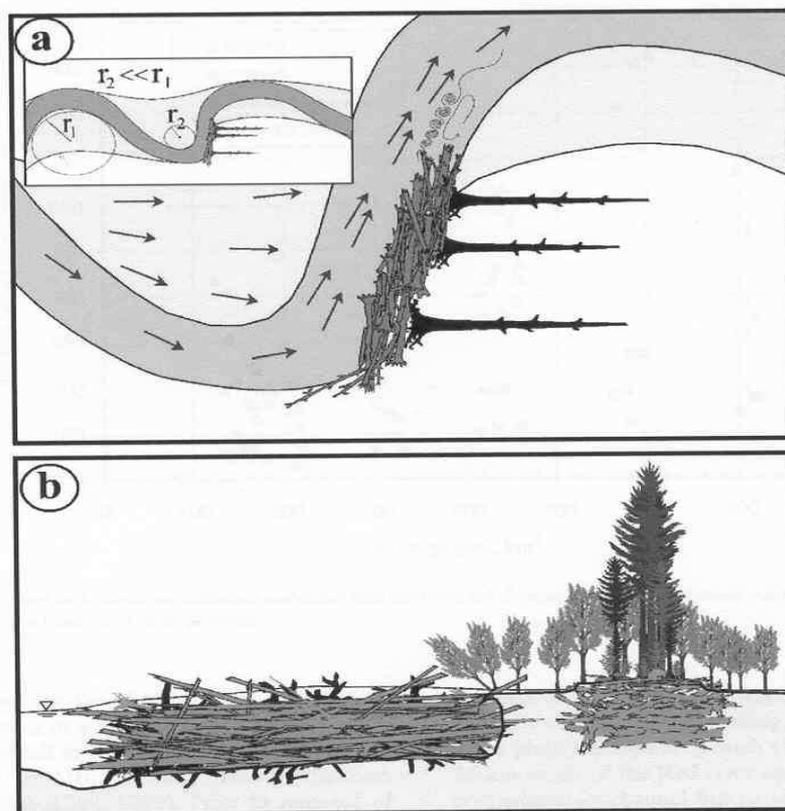


Figura 2.5 - Estructura base de un *meander jam* (Fuente: Abbe y Montgomery, 2003).

2.6 INFLUENCIA MORFOLÓGICA

La presencia de *log jams* en el interior del cauce implica consecuencias sea de tipo morfológico que de tipo ambiental. Los efectos de la madera pueden influenciar en modo directo e indirecto el curso del torrente. Las acumulaciones, de hecho, influyen notablemente la geometría del río modificando el flujo de la corriente, creando zonas de separación y divergencia del filón principal.

La madera puede por lo tanto hacer variar la anchura del canal a través de la desviación de la corriente a nivel de las orillas, causando erosiones localizadas que hacen aumentar la sección del colector. Esto implica que la anchura de un curso de agua en zona boscosa varía notablemente, también en pequeños tramos como viene demostrado en los estudios seguidos en el 1993 a lo largo del Told River en el estado de Washington. También Zimmerman y Otros (1967), han constatado que el ensanchamiento local debido a la desviación de la corriente por parte de los *log jams*, ha tenido un rol dominante en la variabilidad de la anchura del cauce en cuencas menores de 1 km². Estudios independientes efectuados en Wisconsin (Trimble, 1997) y en Nueva Zelanda (Davies-Colley, 1997) han demostrado que los tramos de colectores que atraviesan zonas de bosque tienen una amplitud y una mayor variación de la anchura respecto a los canales que fluyen en territorios sin bosque.

También en las zonas en las cuales han sido efectuadas reforestaciones se ha notado un incremento de la erosión de las orillas y en consecuencia un aumento de la anchura del canal (Murgatroyd y Ternan, 1983); no obstante Smith (1976), ha establecido que la presencia de los aparatos radicales de los árboles sobre las orillas del colector pueden retardar en modo significativo la erosión de las mismas.

Otro efecto causado por los *log jams* es aquel de transformar tramos de torrente con roca en tramos aluvionales, gracias a su capacidad de capturar y almacenar los sedimentos (Montgomery y Otros, 1996). Este efecto repercute sobre el cambio a largo plazo del perfil longitudinal del canal y de la pendiente de un colector (Montgomery y Otros, 2003).

Los *log jams* pueden hacer divergir el flujo de la corriente creando así canales múltiples y transformando un único colector en una serie compleja de ramas de anchura menor (Harwood y Brown, 1993), en especial modo en zonas de fondo valle. Es probable que estos canales entrelazados se formen en cursos de agua donde el cauce no es influenciado por la acción

antrópica; canales con esta forma eran probablemente comunes en época prehistórica mientras que ahora son raros en todo el Norte de Europa (Brown y Keough, 1992). Esta consideración ha sido evidenciada también en otros estudios (Sedell y Froggatt, 1984) que han encontrado como, el Wilamette River (Oregon, USA) era un complejo de canales entrelazados en el 1854 y ha sido progresivamente confinado en un único canal cuando fueron removidos los *log jams*, escavado el lecho y talados los bosques que lo alimentaban de material detrítico leñoso.

Los efectos de los detritos leñosos sobre la morfología del canal varían según la estabilidad de los *log jams*, la cual a su vez varía en función de la dimensión de la madera que crea obstrucción y de la relativa dimensión del canal. Un factor fundamental que condiciona la formación de las acumulaciones leñosas es la presencia de las “piezas claves” a lo largo del lecho del colector que tienden a obstruir el flujo de la corriente y el transporte de sedimentos. El rol de las piezas clave en el bloqueo de otro material leñoso y en la modificación de la morfología del colector ha sido notado ya desde hace tiempo (Habersham, 1881; Deane, 1888; Russell, 1909; Keller y Tally, 1979; Nakamura y Swanson, 1993; Abbe y Montgomery, 1996). Por piezas clave se entienden troncos de grandes dimensiones y difícilmente transportables por la corriente que pueden obstruir fácilmente el canal, siendo además receptores de elementos leñosos más pequeños, que irán a crear la estructura base del *log jams*. Abbe y Montgomery (2003) han demostrado que, en los canales de la cuenca del Queets River (Washington, USA), el grado de obstrucción de las piezas clave varía en consecuencia de las dimensiones del tronco relacionado con la anchura del canal. Los mismos autores han llegado a la conclusión de que los troncos más largos de cerca la mitad de la anchura de la orilla (*bankfull*) y con diámetro mayor de cerca la mitad del tirante hidráulico siempre en condiciones de *bankfull*, tienden a comportarse como piezas claves. Esto implica que un mismo tronco puede tener un gran efecto sobre el cambio de la morfología en un colector de primer y segundo orden y tener efecto prácticamente nulo en canales de orden superior. Ríos como Nisqually River (Washington, USA) en el cual, en el cauce están presentes numerosas piezas claves, forman muchos *log jams* y la carga de madera (piezas de LWD por longitud del curso de agua) es uno o dos ordenes de magnitud mayor respecto a otros ríos como por ejemplo el Snohomish y el Snoqualmie (Washington, USA) en los cuales no están presentes las piezas claves a causa de la construcción de diques y de talas de los bosques circundantes (Abbe y Otros, 2000).

Los tipos de obstrucciones que se crean dependen sobretodo del modo en el cual se dispone la pieza clave respecto a la superficie del colector. La disposición de un tronco

respecto a la superficie del colector puede llevar a la formación de cuatro tipos de obstrucciones base: vertical, oblicua, horizontal y a escalón (*log step*).

Las obstrucciones verticales se comportan como los pilares de los puentes creando remolinos y torbellinos turbulentos que erosionan el lecho del canal (Melville, 1992, 1997). Estas obstrucciones verticales pueden crear varios tipos de pozas: *scour pools*, *eddy pools* o *dammer pools*, (Robinson y Beschta, 1990).

Los troncos colocados en el interior del lecho en posición subparalela a la superficie del colector forman obstrucciones de tipo horizontal que desvían la dirección de la corriente hacia el fondo del lecho del río y crean una erosión localizada con la consecuente formación de fosas (*underscour*).

Las obstrucciones oblicuas son causadas por la madera que se dispone oblicuamente respecto a la superficie del agua; en estas situaciones la desviación de la corriente y el mecanismo de erosión son iguales a las obstrucciones de tipo vertical, pero son más complicadas por las aceleraciones de la corriente de arriba, abajo y entorno del elemento. La erosión debida a la formación de remolinos derivados de obstrucciones sea de tipo horizontal que oblicuo depende del diámetro del tronco, del ángulo de unión, de la velocidad de la corriente, del tirante hidráulico y de la presencia del colector (Beschta, 1983; Cherry y Beschta, 1989). Las obstrucciones de tipo oblicuo pueden crear *scour pools* y *eddy pools*.

Las obstrucciones de tipo escalón (*log steps*) se generan cuando un tronco bloquea el flujo de la corriente dando origen a un peldaño en el interior del cauce del colector. Los *log steps* crean flujos libres que forman las pozas de abajo (*plunge pools*), la profundidad de las cuales depende de parámetros hidráulicos como la energía del flujo, el tirante hidráulico y del grado de turbulencia de la corriente (Mason y Arumugan, 1985; Borman y Julián, 1991). También las características de tipo morfológico condicionan la profundidad de erosión aguas abajo de los *log steps*, como la geometría y la pendiente del colector, la dimensión de sedimentos y la rugosidad hidráulica (Buffington y Otros, 2002). Las obstrucciones a escalón pueden crear saltos que disipan la energía de la corriente de otra forma utilizable para el transporte de sedimentos. Según algunos estudios, el desnivel proporcionado por los *log steps* puede influir entre el 6 y el 80 % sobre el desnivel total del tramo considerado (Heede, 1981; Marston, 1982) o pueden bloquear el sedimento transformando el lecho rocoso de un colector en un lecho aluvionado.

Los *log steps* pueden influenciar la frecuencia de los *pools* en ríos de lecho guijoso. En particular, los troncos aumentan mediante el número de estos y de las barras y da lugar a variaciones espaciales en la anchura del canal. En consecuencia, la madera crea un perfil irregular del cauce aumentando posteriormente la resistencia hidráulica (Buffington y Montgomery, 1999). Algunos estudios han demostrado que en colectores que fluyen en zonas boscosas, la distancia entre los *pools* es inversamente proporcional a la frecuencia del material leñoso (número de piezas por metro), aunque esto es variable según la zona geográfica considerada, y según las características del canal y de la madera (Montgomery y Otros, 1995; Beechie y Sibley, 1997). La eliminación de *log steps* puede cambiar un curso de agua caracterizado de *step-pools* en una morfología a rápida o bien en un lecho plano, según la pendiente del cauce y la carga de sedimentos. En modo parecido la madera puede inducir a la creación de una morfología a *pool-riffle* en un lecho plano o bien en un cauce en roca (Swanson y Otros, 1976; Montgomery y Otros, 1995, 1996).

Existe una relación entre el número de *log jams* y la cantidad de sedimentos en el interior de un colector: más alta es la frecuencia de acumulaciones más elevada será la cantidad de sedimentos almacenados en aquel tramo de canal. En un sistema fluvial con altas cargas de madera, las acumulaciones de sedimento asociadas a los *log jams* pueden actuar de receptores de otro sedimento y disminuir significativamente su tasa de transporte (Massong y Montgomery, 2000; Lacanster y Otros, 2001). Los sedimentos depositados a causa de la madera pueden ser relevantes. En algunos colectores el depósito causado por la madera puede ser mayor en diez veces la producción anual de sedimento regulando así el transporte a lo largo del colector (Megahan y Nowlin, 1976; Swanson y Otros, 1976; Mosley 1981; Hogan, 1986; Bilby y Ward, 1989; Nakamura y Swanson, 1993; Pitlick, 1995). Al contrario, la destrucción de los diques debido a la acumulación de madera, puede dar lugar a una rápida disminución de la acumulación de sedimentos y en consecuencia al aumento del transporte del mismo a lo largo del colector (Beschta, 1979; Bilby, 1981; Megahan, 1982; Heede, 1985; Smith y Otros, 1993).

La cantidad de material leñoso presente en el interior de un cauce aumenta la biodiversidad y el número de los seres vivos (animales y vegetales) de un curso de agua. La madera tiene una fuerte influencia de tipo ecológico sobre un curso de agua yendo a influir sobre diferentes aspectos del ecosistema fluvial: hidráulico, morfológico, estructural, químico-físico.

La madera en el cauce tiene consecuencias de tipo hidráulico en cuanto influencia significativamente la velocidad de la corriente, disminuyéndola y creando así presuposiciones óptimas para muchas especies acuáticas.

La madera tiende también a cambiar la morfología del curso de agua. Las pozas se forman gracias a la presencia de *log jams* y *log step* convirtiéndose en habitats ideales para la vida y la reproducción de variadas especies icticas porque pueden abastecerles refugio durante los eventos de crecidas y por la riqueza de la retención de sustancias orgánicas, (Sedell y Otros, 1988).

Otra consecuencia importante de la madera en el cauce puede ser definida de tipo “estructural”. El material leñoso produce protección y abrigo para muchas especies de peces que se pueden esconder de los predadores en las acumulaciones formadas a lo largo del colector y crea equilibrio para avifauna, anfibios y reptiles acuáticos.

El aspecto físico-químico concierne al sombreado derivado de los árboles que lleva a una disminución de la temperatura del agua y rinde menos visibilidad a las especies icticas. El material leñoso aumenta además la sustancia orgánica en el interior de un colector. Con el paso del tiempo los troncos en el cauce se degradan abasteciendo nutrientes para muchas especies de microorganismos integrando así la producción primaria de los organismos autótrofos (algas), a menudo exigua en torrentes montanos.

2.7 BIBLIOGRAFÍA

- Abbe, T. B., & D. R. Montgomery (1996). Large woody debris jams, channel hydraulics and habitat formation in large rivers. *Regulated Rivers*, 12: 201-221.
- Abbe, T. B., & D. R. Montgomery (2003). Patterns and process of wood debris accumulation in the Queets River basin, Washington. *Geomorphology* 51:81-107.
- Abbe, T. B., D. R. Montgomery, K. Featherston, & E. McClure. (1993). A process-based classification of woody debris in a fluvial network; preliminary analysis of the Queets River, Washington. *EOS Transaction of the American Geophysical Union* 74, 296.
- Abbe, T. B., G. R. Pess, D. R. Montgomery, M. L. White, & B. Smith. (2000). Preliminary performance of engineered log jam technology in protecting infrastructure and

rehabilitating fluvial ecosystems. *EOS, Transactions of the American Geophysical Union* 81(19):S264-265.

Batchelor, G. K. (1967). *An introduction to fluid dynamics*. Cambridge University Press, New York, 615.

Beechie, T. J., & T. H. Sibley. (1997). Relationship between channel characteristics, woody debris, and fish habitat in northwestern Washington streams. *Transactions of the American Fisheries Society*, 126:217-229.

Beschta, R. L. (1979). Debris removal and its effects on sedimentation in an Oregon Coast Range stream. *Northwest Science* 53:71-77.

Beschta, R. L. (1983). The effects of large organic debris upon channel morphology: a flume study. Pages 63-78 in D. B. Simons, editor. *Symposium on erosion and sedimentation*. Simons, Li & Associates, Fort Collins, Colorado.

Bilby, R. E. (1981). Role of organic debris dams in regulating the export of dissolved and particulate matter from a forested watershed. *Ecology* 62: 1234-1243.

Bilby, R. E., & J. W. Ward. (1989). Changes in characteristics and function of woody debris with in creasing size of streams in western Washington. *Transactions of the American Fisheries Society* 118:368-378.

Bocchiola, D., F. Catalano, G. Menduni, & G. Passoni. (2002). An analytical–numerical approach to the hydraulics of floating debris in river channels. *Journal of Hydrology* 269: 65–78.

Bormann, N. E., & P. Y. Julien. (1991). Scour downstream of grade-control structures. *Journal of Hydraulic Engineering* 117:579-594.

Braudrick, C. A., & G. E. Grant. (2001). Transport and deposition of large woody debris in streams: a flume experiment. *Geomorphology* 41: 263-283.

Brown, A. G., & M. Keough. (1992). Palaeochannels, palaeoland-surfaces and the three-dimensional reconstruction of floodplain environmental change. Pages 185-202 in P.

A. Carling & G. E. Petts, editors. *Lowland floodplain rivers: geomorphological perspectives*. Wiley, Chichester, UK.

Buffington, J. M., & D. R. Montgomery. (1999). Effects of hydraulic roughness on surface textures of gravel-bed rivers. *Water Resources Research* 35:3507-3522.

Buffington, J. M., T. E. Lisle, R. D. Woodsmith, & S. Hilton. (2002). Controls on the size and occurrence of pools in coarse-grained forest rivers. *River Research and Applications* 18:507-531.

Chang, F.F.M., & H.W. Shen. (1979). Debris problems in the river environment: Federal Highway Administration Report No. FHWA-RD 79: 62-67.

Cherry, J., & R. L. Beschta. (1989). Coarse woody debris and channel morphology: a flume study. *Water Resources Bulletin* 25:1031-1036.

D'Agostino V. (1999). Strutture in legname nella sistemazione dei corsi d'acqua alluvionali: dalla tradizione all'innovazione. Atti del Convegno *La gestione dell'erosione: scienza, tecnica e strumenti a confronto per il controllo dei fenomeni torrentizi*, 28 maggio 1999. Ed. Bios, Cosenza.

Davies-Colley, R. J. (1997). Stream channels are narrower in pasture than in forest. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 31:599-608.

Deane, W. (1888). A New Hampshire log-jam. *New England Magazine* 30:97-103.

Degetto, M., (2000). *Dinamica del legname in alveo e modellazione del suo comportamento in presenza di briglie filtranti*. Tesi di Laurea in Scienze Forestali ed Ambientali, Università di Padova, pp. 226.

Diehl, T. H. (1997). Potential Drift Accumulation at Bridges. Federal Highway Administration Publication No. FHWA-RD-97-028, pp. 114.

Einstein, H. A., & R. B. Banks. (1950). Fluid resistance of composite roughness, *Eos Trans. AGU*, 31: 603-610.

Giordano, G. (1976). *Tecnologia del Legno*. Enciclopedia, vol. I, pp. 1030- 1110.

- Grant, G. E., & F. J. Swanson. (1995). Morphology and processes of valley floors in mountain streams, western Cascades, Oregon. Pages 83-101 in J. E. Costa, A. J. Miller, K. W. Potter, & P. R. Wilcock, editors. *Natural and anthropogenic influences in fluvial geomorphology*. American Geophysical Union, Geophysical Monograph 89, Washington, D.C.
- Habersham, R. A. (1881). Report of Mr. Robt. A. Habersham, Assistant Engineer, in Report of the Chief of Engineers, U.S. Army, Appendix OO, 2605-2607.
- Harwood, K., & A. G. Brown. (1993). Fluvial processes in a forested anastomosing river: flood partitioning and changing flow patterns. *Earth Surface Processes and Landforms* 18:741-748.
- Heede, B. H. (1981). Dynamics of selected mountain streams in the western United States of America. *Zeitschrift fur Geomorphologie* 25:17-32.
- Heede, B. H. (1985). Channel adjustment to the removal of log steps: an experiment in a mountain stream. *Environmental Management* 9:427-432.
- Hogan, D. L. (1986). Channel morphology of unlogged, logged, and debris torrented streams in the Queen Charlotte Islands. British Columbia Ministry of Forests and Lands, Land Management Report 49, Victoria, BC.
- Ishikawa, Y. (1990). Studies on disasters caused by debris flows carrying logs down mountain. SABO Division, Public Works Research Institute, Ministry of Construction.
- Johnson, A. C., D. N. Swanston, & K. E. McGee. (2000). Landslide initiation, runout, and deposition within clearcuts and old-growth forests of Alaska. *Journal of the American Water Resources Association* 36:17-30.
- Keller, E. A., & T. Tally. (1979). Effects of large organic debris on channel form and fluvial processes in the coastal redwood environment. Pages 169-197 in D. D. Rhodes & G. P. Williams, editors. *Adjustments of the fluvial system*. Kendal-Hunt, Dubuque, Iowa.
- Lancaster, S. T., S. K. Hayes, & G. E. Grant. (2001). Modeling sediment and wood storage and dynamics in small mountainous watersheds. J. B. Dorava, D. R. Montgomery, B.

Palcsak, & F. Fitzpatrick, editors. *Geomorphic processes and riverine habitat*. American Geophysical Union, Washington, D.C. 85-102

- Manga, M., & J. W. Kirchner. (2000). Stress partitioning in streams by large woody debris. *Water Resources Research* 36:2373-2379.
- Marston, R. A. (1982). The geomorphic significance of log steps in forest streams. *Annals of the American Association of Geographers* 72:99-108.
- Mason, P. J., & K. Arumugam. (1985). Free jet scour below dams and flip buckets. *Journal of Hydraulic Engineering* 111:220-235.
- Massong, T. M., & D. R. Montgomery. (2000). Influence of lithology, sediment supply, and wood debris on the distribution of bedrock and alluvial channels. *Geological Society of America Bulletin* 112:591-599.
- Megahan, W. F. (1982). Channel sediment storage behind obstructions in forested drainage basins draining the granitic bedrock of the Idaho Batholith. Pages 114-121 in F. J. Swanson, R. J. Janda, T. Dunne, & D. N. Swanston, editors. *Sediment budgets and routing in forested drainage basins*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report PNW-141, Portland, Oregon.
- Megahan, W. F. & R. A. Nowlin. (1976). Sediment storage in channels draining small forested watersheds. Proceedings of the *Third Federal Interagency Sedimentation Conference*. Water Resources Council, Washington, DC., 115-126.
- Melville, B. W. (1992). Local scour at bridge abutments. *Journal of Hydraulic Engineering* 118:615-631.
- Melville, B. W. (1997). Pier and abutment scour: integrated approach. *Journal of Hydraulic Engineering* 123:125-136.
- Montgomery, D. R., B. D. Collins, J. M. Buffington, & T. B. Abbe. (2003). Geomorphic effects of wood in rivers. *American Fisheries Society Symposium* 37, Ed. by S. Gregory, K. Boyer, A. Gurnell. 21-47.

- Montgomery, D. R., J. M. Buffington, R. Smith, K. Schmidt, & G. Pess. (1995). Pool spacing in forest channels. *Water Resources Research* 31:1097-1105.
- Montgomery, D. R., T. B. Abbe, N. P. Peterson, J. M. Buffington, K. Schmidt, & J. D. Stock. (1996). Distribution of bedrock and alluvial channels in forested mountain drainage basins. *Nature* (London) 381:587-589.
- Mosley, M. P. (1981). The influence of organic debris on channel morphology and bedload transport in a New Zealand forest stream. *Earth Surface Processes and Landforms* 6:571-579.
- Murgatroyd, A. L., & J. L. Ternan. (1983). The impact of afforestation on stream bank erosion and channel form. *Earth Surface Processes and Landforms* 8:357-369.
- Nakamura, F., & F. J. Swanson. (1993). Effects of coarse woody debris on morphology and sediment storage of a mountain stream system in western Oregon. *Earth Surface Processes and Landforms* 18:43-61.
- Pecorari, E. (2003). *Analisi del movimento dei tronchi in alvei fluviali*. Tesi di laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, Università di Padova, pp. 80.
- Pitlick, J. (1995). Sediment routing in tributaries of the Redwood Creek basin, northwestern California. *U.S. Geological Survey Professional Paper* 1454-K, GPO, Washington, D.C.
- Robison, E. G., & R. L. Beschta. (1990). Coarse woody debris and channel morphology interactions for undisturbed streams in southeast Alaska, USA. *Earth Surface Processes and Landforms* 15:149-156.
- Russell, I. C. (1909). *Rivers of North America*. G. P. Putnam's Sons, New York.
- Sedell, J. R., & J. L. Froggatt. (1984). Importance of streamside forests to large rivers: the isolation of the Willamette River, Oregon, U.S.A., from its floodplain by snagging and streamside forest removal. *Verhandlungen-Internationale Vereinigung fur Theoretische und Angewandte Limnologie* 22:1828-1834.

- Sedell, J. R., P. A. Bisson, E J. Swanson, & S. V. Gregory. (1988). What we know about large trees that fall into streams and rivers. Pages 47-81 in C. Maser, R. F. Tarrant, J. M. Trappe, & J. E Franklin, *From the forest to the sea: a story of fallen trees*. U.S. Forest Service General Technical Report PNW-GTR-229.
- Smith, D. G. (1976). Effect of vegetation on lateral migration of anastomosed channels of a glacier meltwater river. *Geological Society of America Bulletin* 87:857-860.
- Smith, R. D., R. C. Sidle, & R E. Porter. (1993). Effects on bedload transport of experimental removal of woody debris from a forest gravel-bed stream. *Earth Surface Processes and Landforms* 18:455-468.
- Swanson, F. J., G. W. Lienkaemper, & J. R. Sedell. (1976). History, physical effects, and management implications of large organic debris in western Oregon streams. USDA Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, General Technical Report GTR-PNW-56, Portland, Oregon.
- Trimble, S. W. (1997). Stream channel erosion and change resulting from riparian forests. *Geology* 25:467-469.
- Wohl, E., S. Madsen, & L. MacDonald. (1997). Characteristics of log and clast bed-steps in step-pool streams of northwestern Montana. *Geomorphology* 20:1-10.
- Zimmerman, R. C., J. C. Goodlet, & G. H. Comer. (1967). The influence of vegetation on channel form of small streams. *Symposium on River Morphology*. International Association of Hydrological Sciences Publication 75:255-275.

3 DIQUES PARA LA CORRECCIÓN DE TORRENTES Y DIQUES ABIERTOS

3.1 DEFINICIÓN

La ordenación hidráulico-forestal concierne a las obras, las reglas para construirlas y el modo de emplearlas para eliminar las causas o contrastar los efectos de los fenómenos aluvionales, de los procesos erosivos y desprendimientos, de las coladas detríticas y fangosas, de movimientos de masa, además de la caída de avalanchas que suceden en las cuencas torrenciales (Puglisi, 2003).

La ordenación hidráulico-forestal se divide en *obras intensivas*, que regulan el caudal y el transporte sólido, y consisten en obras intensivas e intervenciones localizadas en el cauce, y las *obras extensivas* las cuales tienen la finalidad de detener en el origen la producción de sedimentos, los desprendimientos, coladas de masas, avalanchas, y consisten en obras e intervenciones difusas sobre las vertientes de la cuenca torrencial.

Los objetivos de la ordenación pueden tener finalidades más amplias que las de la corrección torrencial y de la defensa y conservación del suelo, como por ejemplo el restauración ambiental y la recuperación de los ecosistemas. A esta finalidad añadida, se llega mediante obras de bajo impacto ambiental, por tipología y/o material empleado, cada vez que eso sea posible.

3.2 GENERALIDADES

El ecosistema fluvial está constituido por componentes bióticos, derivados del carácter “natural” del sistema fluvial mismo, y abióticos, también dependientes de los procesos legados a la esfera conocida del hombre y a las mismas acciones antrópicas. El ecosistema está articulado en subsistemas que actúan y que se modifican, también para equilibrar, según un mecanismo de autorregulación interna, las acciones que derivan de otros subsistemas o del hombre mismo.

Una visión “ecológica” de las intervenciones en el curso de agua presupone, entonces, que el hombre tenga en cuenta, además del aspecto económico ligado, por ejemplo, a la salvaguardia de un recurso vital, también el aspecto ambiental. En esta óptica la intervención

antrópica debería inserirse en el ambiente fluvial sin trastocar el equilibrio dinámico alcanzado y de todas formas teniendo cuidado por los otros elementos del ecosistema.

La disciplina de la ordenación hidráulico-forestal ha sido influenciada, en estos últimos años, ya sea en la elección de proyectos ejecutivos, ya sea en las direcciones de búsqueda de nuevos lineamientos, por la exigencia de dar respuestas a estas visiones tanto “ecologista” como “sistémica” de las intervenciones antrópicas utilizando como unidad territorial de referencia, como está previsto también en la normativa nacional vigente en Italia, la cuenca hidrográfica (Ferro y *Otros*, 2004). Aun así, siendo la finalidad principal de la ordenación hidráulico-forestal la salvaguardia, la conservación y la manutención del territorio montano, está claro que a esta gestión venga a corresponderle también un mejoramiento de las condiciones de seguridad en las áreas del valle y de llanura, aguas abajo.

La orientación actual de la disciplina, en busca de una armonía de las intervenciones con el ecosistema montano en los cuales están inseridos, prevé la utilización de técnicas de ingeniería naturalista y de criterios de “reconstrucción morfológica” (Lenzi y *Otros*, 2000) de los cursos de agua compatibles con la tendencia de los mismos, a largo plazo, a alcanzar una condición de estabilidad plano-altimétrica, como así también el uso de materiales (gaviones, grandes piedras y bloques sueltos, masas ligadas, etc.) que facilitan la inserción ambiental de las obras, o bien la modificación de la geometría de las obras orientada a mitigar algunos aspectos negativos como la retención total del material sólido aguas arriba de las obras transversales.

En esta óptica de renovado interés por los problemas de tutela del paisaje y de mejoramiento o de mantenimiento de la calidad del ambiente fluvial, la innovación más importante iniciada entorno al 1950, es ciertamente la introducción de los “diques abiertos” (diques con una altura de no más de 10 m y una capacidad de hasta 100.000 m³), denominados también diques con claraboya, selectivos o filtrantes, que, si son correctamente dimensionados, están en grado de ejercitar, a diferencia de las clásicas obras a cuerpo lleno, una acción de laminación ya sea del caudal líquido como así también del caudal sólido (Puglisi, 1967; Benini, 1990; Ferro, 1990; Ferro y *Otros*, 2004).

Las clásicas intervenciones de tipo estructural, como aquellas que recurren a encauzamientos, canales revestidos o a diques para la corrección de los cauces, permanecen insustituibles en aquellos casos de marcado desequilibrio (cauces excavados, coladas

detríticas, cursos de agua a elevada capacidad de transporte, etc.), en los cuales el empleo de intervenciones extensivas a escala de vertiente o a obras de ingeniería naturalista puede no ser resolutivo del relevante problema de ordenación y, por lo tanto, esta categoría de obras debe ser considerada como una útil integración a las intervenciones intensivas de corrección fluvial (Lenzi y *Otros*, 2000).

En estos últimos años, además de la sensibilidad de la opinión pública hacia el ambiente montano, también la posibilidad de utilizar técnicas de protección de la madera capaces de disminuir el proceso de degradación imputable a las características del ambiente considerado, ha dado un nuevo impulso a la utilización de este material, eventualmente acoplado con bloques o masas de piedras, para la construcción de obras de ordenación hidráulica (Andrich y D'Agostino, 2000). La inserción en el curso de agua de obras en madera o leña y masas de piedras es positivamente valorada ya sea por su capacidad de contribuir “en modo natural a la definición del paisaje, al cual le confiere también una recalificación estética dando un sentido de cuidado y de orden” (D'Ambros, 1994; Andrich y D'Agostino, 2000), como así también por la tendencia a no considerar ninguna ordenación como definitiva, teniendo en cuenta que esta condición no es asegurada a largo plazo ni siquiera en el caso de las clásicas obras transversales en hormigón o en hormigón armado.

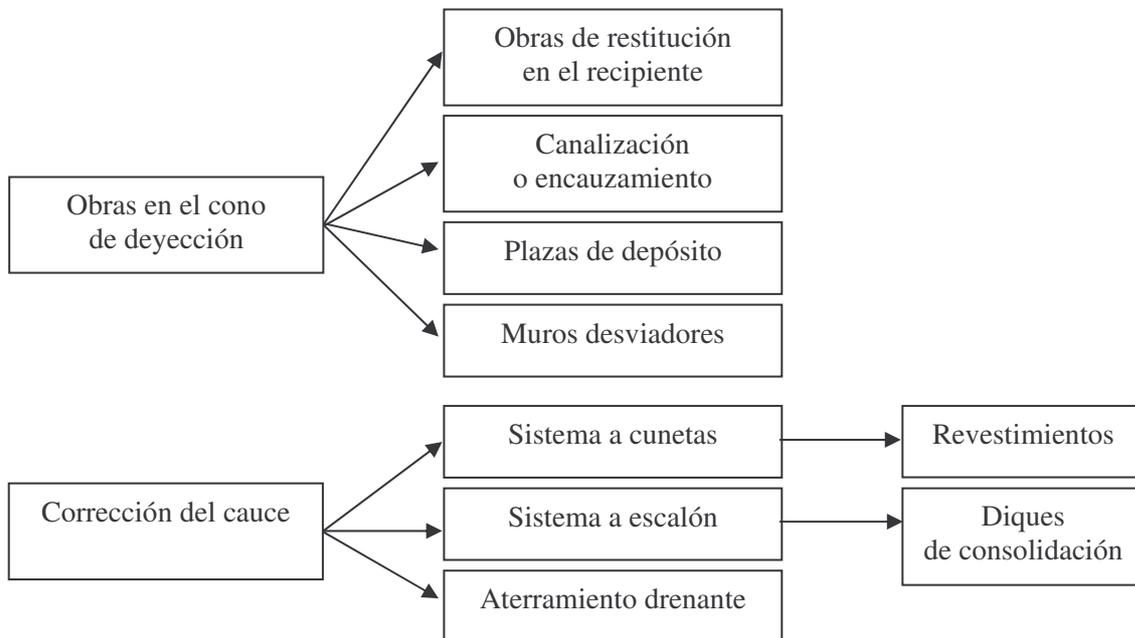
La utilización de masas de piedras y de bloques, otro material histórico de las ordenaciones hidráulicas, junto a la necesidad de mantener la continuidad morfológica del curso de agua, ha llevado al empleo de las rampas de piedra, en sustitución de los diques transversales de hormigón en secuencia. Su empleo se justifica también por la circunstancia de que los diques representan una barrera física insuperable para la fauna ictica, con excepción de los salmónidos que pueden superar saltos verticales de hasta un máximo de un par de metros de altura, e impiden a la misma de recolonizar ambientes fluviales temporalmente abandonados (Ferro y *Otros*, 2004). Las rampas en piedra, además de estar adaptadas a estabilizar el fondo móvil de un cauce natural permiten ya sea un intercambio biológico entre la zona de aguas arriba y de aguas abajo de la obra, ya sea la repoblación ictica. Se trata de construcciones realizadas con piedras de gran tamaño, dispuestas de modo regular o irregular sobre más de un estrato superpuesto, que creando espacios vacíos y quebrados, determinan sensibles variaciones de la velocidad de la corriente sobre la rampa facilitando la remonta de los peces y contribuyendo a una local diversificación del ambiente fluvial (Ferro y *Otros*, 2004).

3.3 CLASIFICACIÓN DE LAS OBRAS

Las obras empleadas en la ordenación hidráulica del tramo montano de un curso de agua, pueden ser además reagrupadas en dos grandes categorías:

- Obras transversales, que se insertan en la sección transversal del curso de agua y por lo tanto son normales a la dirección principal de la corriente fluvial. A esta categoría pertenecen los umbrales de fondo, los diques y las rampas;
- Obras longitudinales, dispuestas a lo largo de la orilla fluvial que deben proteger. A esta categoría pertenecen los revestimientos de las orillas (con bloques de piedra sueltas o ligadas, con vegetación, etc.), los muros de ribera, encauzamientos y los *rock-chute channels*.

Con referencia a los diques, la Tabla. 3.1 muestra un útil esquema sinóptico, propuesta por Puglisi (1977), orientado a establecer el tipo de obra y/o de estructura más idóneo para resolver el problema de ordenación en examen.



(Sigue)

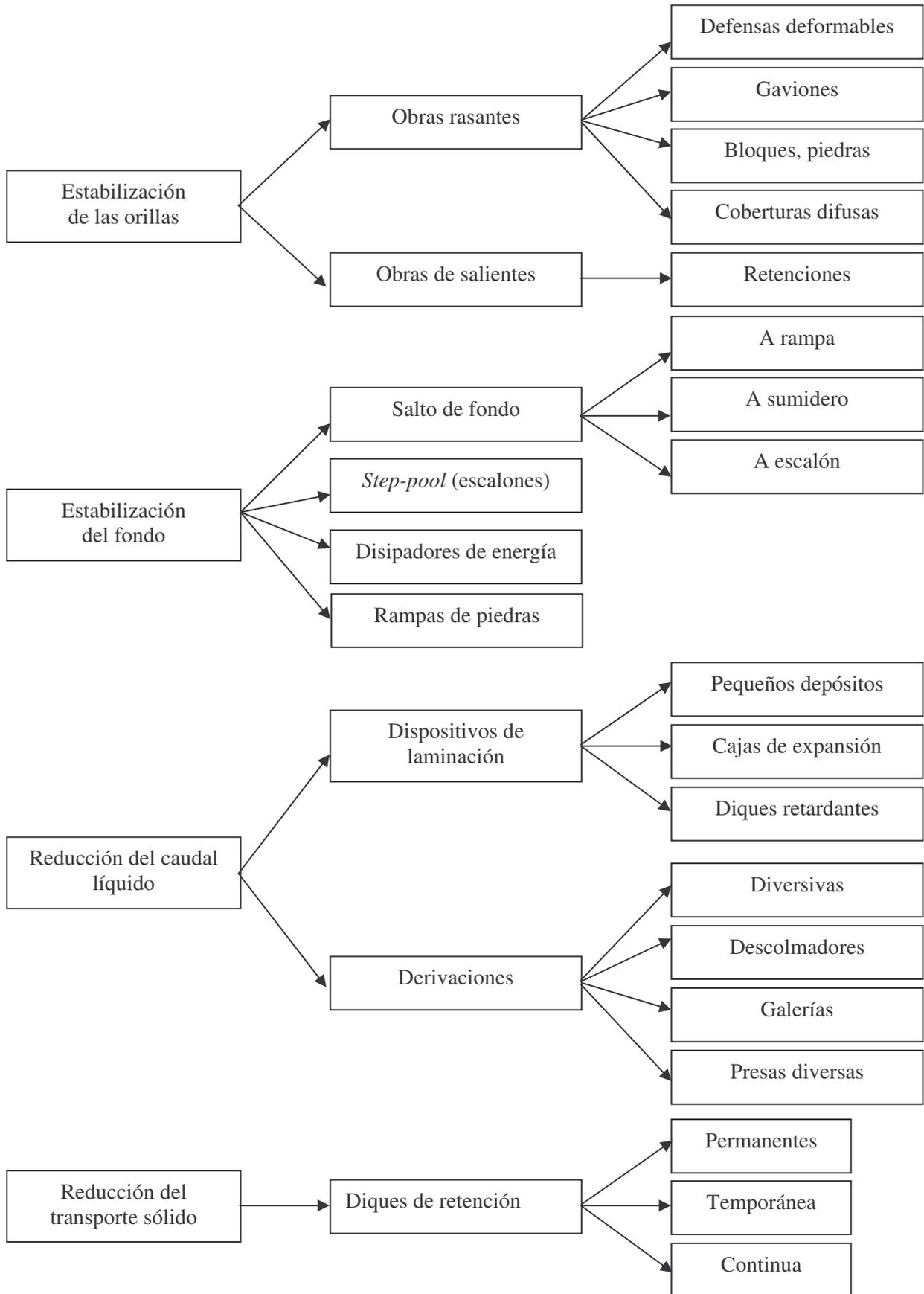


Tabla 3.1 - Tabla sinóptica de obras de ordenación hidráulica-forestal (obras intensivas).

En la Tabla 3.2, los principales tipos de diques, subdivididos en dos categorías con referencia a su función de ordenación (consolidación, retención) son distribuidas en cinco clases (A, B, C, D, E).

Los diques de consolidación cerrados o a estructura llena (clase A) han sido clasificados por su geometría y disposición planimétrica (rectilíneas A1, en arco A2) especificando para la subclase A1 los diferentes tipos correspondientes al particular funcionamiento estático de la obra (a gravedad, a vigas, a ménsula).

En la clase B son reagrupados los diques abiertos o con claraboyas, los cuales mantienen siempre una función de consolidación, diferenciados en obras verticales y horizontales. Las primeras, denominadas a retículo o enrejadas (Clase B1), tienen origen en una modificación del cuerpo de la obra a través de la realización de una abertura en la cual encuentra alojamiento una reja, que puede ser vertical o inclinada, o un peine o rastrillo (dique a peine o a rastrillo).

Son denominadas horizontales (subclase B2) aquellas obras que tienen una configuración planimétrica-geométrica tal de determinar la paracentesis de los materiales fluidos y tienen origen en específicas realizaciones y experimentaciones de campo (dispositivo Rosic, dispositivo Clauzel y dispositivo Clauzel modificado por Puglisi).

La segunda categoría (diques de retención) prevé una subdivisión en tres clases que se distinguen por las características de la sedimentación aguas arriba de la obra (permanente, temporánea, continua). La clase C comprende las mismas subclases A1, A2, y B1 dado que los diques a cuerpo lleno y aquellos verticales B1 son utilizados también con función de retención, indiscriminada o discriminada con referencia a las dimensiones del material sólido. La clase C reagrupa obras que determinan un colmado permanente-limitado, ya que es limitada la capacidad de almacenamiento disponible aguas arriba de la obra. La clase D comprende, en cambio, obras de retención que en el tiempo pueden restablecer su capacidad inicial en modo parcial o total.

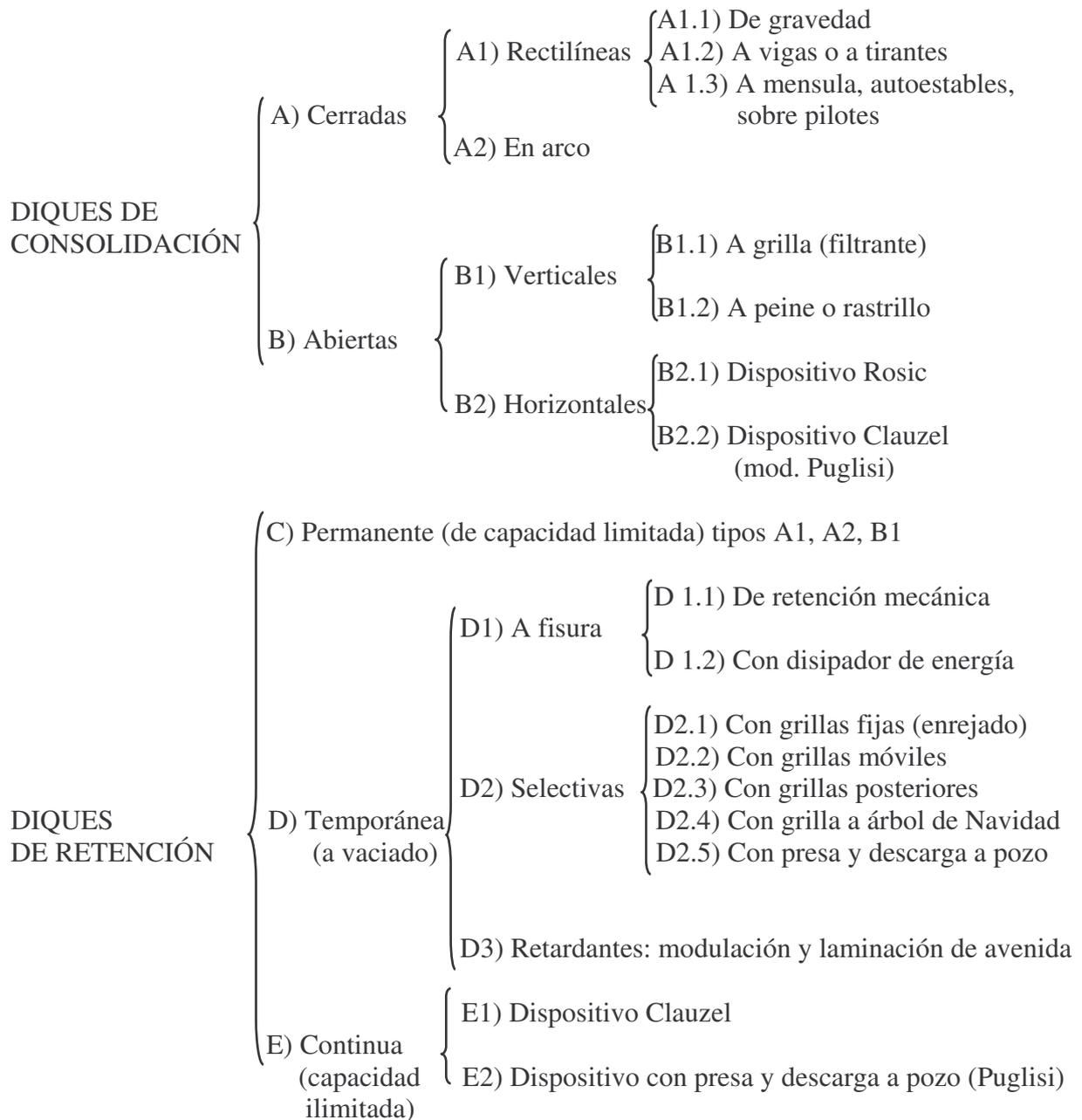


Tabla 3.2 - Clasificación de los diques de corrección de torrentes (fuente: AIDI-IILA, 1983).

Los diques a fisura o a hendidura de la subclase D1 se llenan en ocasiones de eventos de avenidas relevantes y pueden vaciarse lentamente gracias a una acción de autolimpieza operada por la capacidad erosiva de la corriente fluvial. La hendidura puede determinar una acción de retención de tipo mecánico o puede ser dimensionada, para operar una selección granulométrica del material sólido mediante fenómenos disipadores que actúan en el pasaje de la corriente de rápida a lenta a través la creación de un resalto hidráulico, aguas arriba de la

obra. Para los diques de la subclase D2, en cambio, la acción de retención es siempre de tipo mecánico, e interesa solo los materiales de mayor dimensión, y el vaciado ocurre artificialmente. Los diques de la subclase D1 y D2 se pueden considerar retardantes del caudal sólido, y pueden ejercitar ya sea una acción de control y laminación del transporte sólido, ya sea una selección granulométrica del material sólido transportado. En la subclase D3 están incluidos los diques denominados retardantes (Puglisi ,1967) o sea capaces de ejercitar, como el dique a ventana oportunamente dimensionado, una acción de modulación del caudal líquido. En la clase E recaen, por último, los diques de retención a capacidad teóricamente ilimitada como el dispositivo Clauzel.

Estos diques son obras de modesta ingeniería, salvo que la altura supere los 10 metros. Sólo un hecho particular los diferencia y es la circunstancia que la obra, sujeta primero al empuje hidrostático está destinada, a medida que el vaso se va aterrando, a transformarse en una obra de sostén de tierras sin conocerse a priori las características físicas y mecánicas de esos materiales.

El correcto dimensionamiento y el buen proyecto y realización de los diques presupone:

- correcta ubicación, ligada a la comprensión del fenómeno torrencial a controlar;
- elección funcional del tipo de dique a adoptar para conseguir el efecto de corrección buscado;
- análisis técnico-económico de los materiales de construcción a emplear según la disponibilidad y/o facilidad de transporte;
- aplicación de normas de cálculo apropiadas para el dimensionamiento estático de la obra;
- cautela en el dimensionamiento hidráulico-sedimentológico a efectos de impedir que los caudales líquidos y sólidos de crecientes puedan dañar la obra;
- previsión de los elementos estructurales complementarios a fin de impedir que las hipótesis hechas en el cálculo de los coeficientes de seguridad no se modifiquen durante la ejecución de las obras;
- evaluación del impacto ambiental de la obra y propuesta de medidas de atenuación del impacto como parte del proyecto.

La finalidad de la ordenación hidráulica del torrente es la de seguir la dinámica y la evolución morfológica natural del curso de agua realizando obras que responden a las señales requeridas de compatibilidad ambiental y, al mismo tiempo, sean eficaces para los objetivos perseguidos en la ordenación. En la óptica de la recuperación hidráulica del curso de agua, se introduce el tentativo de atribuir a una obra clásica como el dique, (además de las funciones tradicionales de consolidación de las riberas del cauce, de estabilizaciones del fondo y de retención del material sólido aguas arriba), también aquellas de regular el caudal líquido, de romper las coladas detríticas con la finalidad de reducir la sollicitación dinámica de las obras y, por último, de seleccionar el material sólido en los casos en los cuales se adoptan tipologías constructivas no convencionales (Ferro, 2002).

En la Tabla 3.3 es citado un diagrama a bloques introducido por Fiebiger (Dalla Giacomina y Otros, 1989; Ferro, 1990; Fiebiger, 1986) en el cual son sintetizadas las dichas funciones del dique. La necesidad de elegir un tipo de dique adecuado a la particular función que ese debe cumplir, ha determinado un proceso de innovación en el sector de las ordenaciones hidráulicas que se alimentan ya sea de la continua profundización del conocimiento teórico, ya sea de la experiencia ya adquirida.

Los diques selectivos o abiertos permiten una retención no indiscriminada del material sólido transportado por la corriente, ya que el material sólido más grueso transportado durante los eventos de avenida es retenido aguas arriba de la obra, mientras el material de pequeña y mediana dimensión prosigue aguas abajo hacia el valle, mejorando la eficacia de la misma ordenación. De hecho la posibilidad de disponer material sólido aguas abajo de la obra ofrece también una valencia ecológica, porque evita la profundización del fondo del mismo cauce, y porque conserva el equilibrio del curso de agua en el tronco fluvial, que de todas formas resultaría alterado por el aumento de la capacidad de transporte de la corriente. Además, durante el periodo de estiaje, la corriente atraviesa las luces del dique sin determinar rebosaduras a monte y, en relación a su capacidad de erosión y de transporte, puede remover parte del material sólido depositado durante la avenida, recogiendo aguas abajo, y restableciendo, aguas abajo del dique, una zona de depósito. El resultado de esta acción natural puede en cada caso ser mejorado con cualquier modesta intervención antrópica. A esta nueva concepción del uso del dique se acompaña, por último, además de un aumento de la funcionalidad, también tiempos y costes de construcción más reducidos, además de la posibilidad de recurrir a la prefabricación parcial o total.

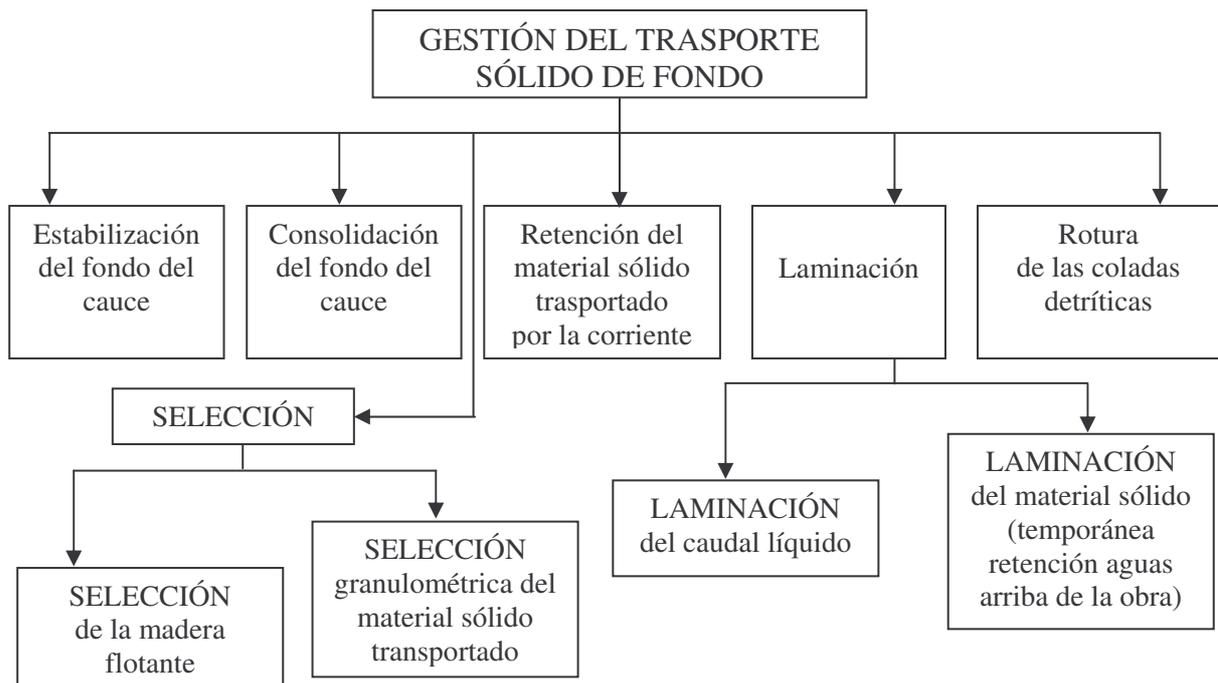


Tabla 3.3 - Diagrama a bloques recopilado de las diferentes funciones de un dique.

3.4 DIQUES ABIERTOS O SELECTIVOS

La ordenación hidráulica del tramo montano de un curso de agua tiene el objetivo de realizar una condición de equilibrio permanente entre el caudal líquido y aquel sólido, capaz de asegurar la estabilidad, mediante intervenciones de consolidación, de la cavidad fluvial para proteger las áreas antropizadas, mediante obras de retención, de los eventos aluvionales, ya sea mediante intervenciones de regulación del caudal y de los sedimentos transportados (D.M, 1912).

El empleo de los diques y la tipología constructiva preelegida, en forma similar a lo que sucede en el campo de los progresos concernientes a la tecnología y a las técnicas constructivas empleadas por el hombre, han evolucionado y reflejan una utilización orientada ya sea a aspectos siempre más funcionales al específico objetivo perseguido de ordenación (consolidación de las riberas, estabilizaciones del fondo, retención de material sólido grueso, laminación del caudal líquido, rotura de las coladas detríticas, etc.), como así también al objetivo de garantizar en Italia el respecto de las vigentes disposiciones de ley en materia de tutela ambiental de los ecosistemas fluviales (Ferro y *Otros*, 2004).

Una precisa valencia ambiental (Zolin, 1995) han asumido las obras de tipo abierto o selectivo que permiten una retención no indiscriminada del material sólido transportado, por el cual, solo el material grueso de mayores dimensiones, predominantemente transportado en eventos de riada, es retenido aguas arriba del dique, mientras aquel de pequeñas y medias dimensiones prosigue aguas abajo, hacia el valle, mejorando la eficacia de la misma ordenación.

En el caso de las intervenciones de consolidación, la posibilidad de acompañar el material sólido aguas abajo de la obra evita la profundización del fondo del cauce al pié de la obra, y asegura el mantenimiento del equilibrio del curso de agua en el tronco del valle que de otra forma resultaría alterado por el aumento de la capacidad de transporte de la corriente. Además, durante el periodo de estiaje la corriente fluvial, en relación a su capacidad de erosión y transporte, puede remover parte del material sólido depositado durante la avenida, dirigiéndolo hacia aguas abajo, y restableciendo, aguas arriba del dique, una zona de depósito. El resultado de esta acción natural de autolimpieza puede en cada caso ser mejorada con cualquier modesta intervención de manutención ordinaria y de restauración de la capacidad de almacenamiento del embalse (Ferro y *Otros*, 2004).

La retención de los materiales aguas arriba de los diques puede ser la única solución posible cuando esos materiales provienen de zonas de la cuenca inaccesibles o incorregibles por la gravedad del desequilibrio, o bien, cuando se trata de evitar daños a zonas habitadas, durante el tiempo necesario para que las medidas biológicas y mecánicas adoptadas en el lugar de origen de la erosión, produzca los efectos buscados. En estos casos los diques actúan sobre los efectos del desequilibrio y se denominan diques de retención. La capacidad de la obra de retener preferentemente el material de mayores dimensiones maximiza la eficacia de ordenación en correspondencia a los eventos extremos de inundación, dado que la capacidad de embalse aguas arriba del dique permanece disponible solo para la acumulación de material de grandes dimensiones. También en el caso de obras de retención, un adecuado diseño y proyecto de la obra puede consentir un funcionamiento de ella caracterizada de una apreciable capacidad de autolimpieza en condiciones de caudales medios y de estiaje (Larcher y Armanini, 2000). La variedad de tipologías de diques que se han desarrollado en el curso de los años ha permitido poner atención a los diferentes problemas que caracterizan los torrentes montanos. En particular, relativamente a la problemática de los *Large Woody Debris* (LWD), diferentes han sido las obras proyectadas, aunque, todavía, el problema es objeto de estudio

dada la dificultad de enmarcar el proceso físico y la variabilidad de los parámetros hidráulicos, sedimentológicos y vegetacionales implicados.

3.5 EVOLUCION HISTÓRICA DE LOS DIQUES DE CORRECCIÓN DE TORRENTES E INTRODUCCIÓN DE LOS DIQUES ABIERTOS

En época romana la regulación de los cursos de agua montanos tiene origen en la exigencia imperativa de proteger la agricultura permanente. Se desarrolló así una primera técnica constructiva rudimentaria defensiva para la realización de obras en cauces que debían tener la función de controlar la erosión y la fluctuación en las áreas mayormente antrópicas y utilizadas con fines productivos. Estas obras fueron realizadas en madera y piedra, materiales constructivos de fácil localización en el ambiente montano. A continuación, en el curso del siglo XV y XVI, las metodologías de intervención dejaron la espontaneidad artesanal de los inicios evolucionando siempre más hacia un verdadero y propio procedimiento de proyecto (Ferro y *Otros*, 2004).

Enseguida los técnicos se dieron cuenta que las intervenciones limitadas al tramo terminal de los torrentes, no eran suficientes para enfrentar el creciente peligro de inundación lateral determinado por el aterramiento de los cauces y de los fenómenos aluvionales y de depósito de detritos sobre los conoides de deyección. Surgen, de este modo, las primeras intervenciones de ordenación, con la finalidad de reducir el caudal sólido de los cursos de agua (siglo XVI y XVII), consistentes en obras aptas ya sea a retener las acumulaciones de sedimento (diques de retención), ya sea en obras idóneas a reducir la erosión sobre el fondo y a disminuir la pendiente del cauce (diques de consolidación y umbrales de fondo).

Para la ubicación y la construcción de los diques de retención fueron elegidas secciones estrechas e incisas en la roca, localizadas en la extremidad inferior de tramos de cauces de río anchos y con poca pendiente, que permitían obtener amplias zonas de embalse útiles para el depósito del material retenido de las obras. Ya sea los diques de consolidación, como aquellos de retención, a partir de un valor inicial de altura de la obra predefinida, venían sucesivamente sobreelevadas una vez alcanzado el completo aterramiento de la obra. En los textos históricos de las ordenaciones hidráulicas forestales (Di Tella y Bay, 1946), relativamente a las obras de consolidación, venía enfatizado el concepto de gradualidad de la ordenación, que preveía una fase inicial de “primera instalación” de las obras transversales, con las cuales se asignaba al

torrente una “pendiente de compensación” de primer grado, al cual debían seguir al menos otras dos posteriores fases de corrección (“pendiente de compensación” de segundo y tercer grado) de realizarse o por “instalación” de nuevos diques intermedios o por sobreelevación de aquellos ya realizados.

Contemporáneamente se desarrolla la técnica ejecutiva de escalinatas de diques de consolidación construidas en mampostería de piedra seca, con la finalidad de consolidar tramos de cauce a elevada pendiente sujetos a constantes fenómenos erosivos. Un ejemplo de utilización de tal práctica de ordenación se puede encontrar sobre el torrente Varone (en provincia de Trento) donde existe una escalinata de diques en madera rellena con grandes rocas, construida en época napoleónica (Fig. 3.1). Estas primeras obras sufrieron frecuentes y destructivas desestabilizaciones, en ocasiones de eventos hidrológicos excepcionales, pero fueron persistentemente restauradas y reconstruidas por su importante función de protección y de retención, fundamentalmente para la incolumidad física de la población y de los habitantes (Ferro y *Otros*, 2004).

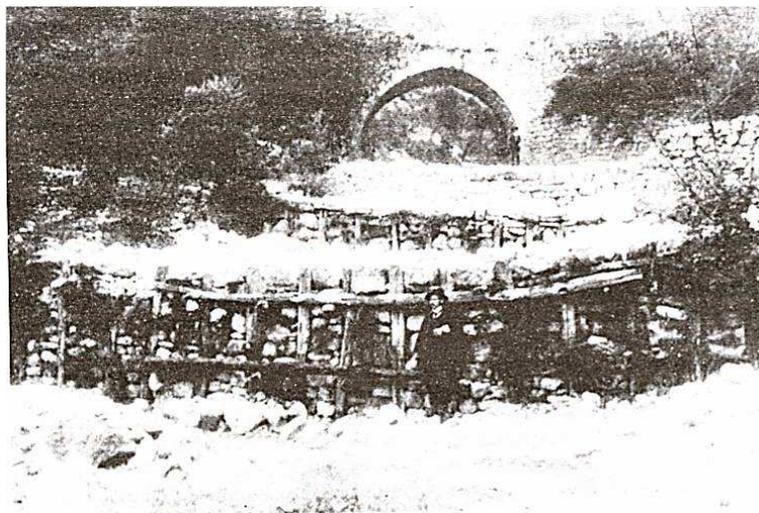


Figura 3.1 - Dique sobre el torrente Varone (fuente: Ferro y *Otros*, 2004).

Tras la fin del XVIII y el inicio del siglo XIX, con la experiencia madurada, pero sobretudo con el desarrollo de la ciencia y de las técnicas constructivas, fueron construidas obras capaces de resistir eventos de riadas de notable entidad, tanto que algunas de éstas, en particular aquellas erigidas durante el siglo XIX, están todavía en perfectas condiciones de funcionamiento. Justo en este último periodo empezaron a surgir numerosas discusiones sobre la eficacia y la correcta ubicación de las susodichas obras.

Zallinger no reconocía en los diques de retención una solución de grande eficacia y subrayaba la limitada funcionalidad en el tiempo, imputable al rápido aterramiento del embalse aguas arriba de las obras. Aretin fue el primero a sostener la mayor eficacia de los diques transversales colocados en las zonas montanas de las cuencas, en particular a lo largo de los colectores de primer orden y sobre los colectores de orden superior antes de su desembocadura en el conoide. Fue además promotor de técnicas de ordenación que recurrían a escalinatas de diques o a diques en secuencia longitudinal de modestas dimensiones, más bien que a obras aisladas de notable envergadura.

También en el siglo XX el dique de retención ha sido considerado una fiable intervención de ordenación, no obstante una general disminución constructiva dictada por la Primera y la Segunda Guerra Mundial. El periodo comprendido entre los dos conflictos bélicos fue caracterizado por una fuerte actividad de ordenación de montaña, tanto que en la región Trentino Alto Adige, en el periodo de veinte años que va del 1925 al 1945, fueron edificados por la Milicia Forestal 42.000 obras transversales entre diques de madera y diques en piedras, y 38.000 metros lineares entre las defensas de orillas y cunetas empedradas (Ferro y *Otros*, 2004).

El proceso de innovación conectado a la introducción en las prácticas de ordenación de las obras de tipo abierto ha tenido inicio en Francia después del 1950 y ha determinado la búsqueda de soluciones de proyectación respetuosas de los diferentes aspectos evidenciados (selección granulométrica del material sólido, acción de retención no indiscriminada del material sólido aguas arriba de la obra, continuidad de una mínima alimentación sólida aguas abajo y en la desembocadura del curso de agua (Puglisi, 1967)).

Entre los primeros diques abiertos son de particular importancia aquel filtrante ideado por Poncet (Poncet, 1960) y aquel “a peine” o a rastrillo del 1952 e “inclinado” del 1955 propuesto por el Ingeniero Genet (Genet, 1953). Después de estos primeros prototipos han sido propuestos y realizados múltiples tipos de diques abiertos, algunos de los cuales están aún en fase de experimentación, mientras otros se han convertido en uso corriente en Italia. La multiplicidad de los tipos disponibles ha alimentado también dudas sobre la eficacia de ordenación de los diques abiertos y ha soportado la idea, como refiere Cola (Cola, 1970), que el recorrido a estas obras fuese sustancialmente basado más que en un real convencimiento de la utilidad de la tipología constructiva preelegida, en la necesidad de los técnicos de

“mostrarse más modernos en la proyectación y diseño”. Es necesario de todas formas evidenciar que, no obstante las numerosas investigaciones sea de tipo teórico sea experimentales efectuadas en estos últimos años, las cuales han consentido de poner las bases para efectuar un dimensionamiento de las obras de tipo abierto que fuese exento de empirismos o de reglas deducidas de la sola observación de las intervenciones ya realizadas (análisis ex-post), el funcionamiento de los diques de tipo abierto resulta complejo y no del todo aclarado en sus múltiples aspectos (Milano, 2003). Las dificultades comparadas derivan de la multiplicidad de factores que es necesario tener en consideración y que influyen a los fenómenos considerados. En cada caso el diseño y proyecto debe ser afrontado según modalidad que tenga en cuenta, además de la particularidad de la situación examinada, también el específico objetivo (consolidación, retención) para el cual la obra viene construida.

Si, por ejemplo, un dique abierto además de permitir un arresto no indiscriminado del material sólido durante su primera fase de funcionamiento y una laminación del caudal sólido transportado, debería tener la finalidad de reducir el transporte sólido aguas abajo de la obra, a esa tendría que ir acoplada una ordenación de las vertientes de la cuenca hidrográfica de alimentación al fin de limitar el aporte sólido según valores considerados compatibles con el tronco fluvial aguas abajo del dique.

Es oportuno verificar que durante un evento de riada excepcional (con tiempo de retorno de 100 años) la capacidad de embalse disponible aguas arriba del dique consiente retener temporáneamente la totalidad, a una alícuota de cualquier modo relevante, del transporte sólido arrastrado. En el caso que haya sido realizada una secuencia de diques abiertos no siempre será posible tener expectativas sobre el volumen completo que puede ser retenido por todas las obras de la secuencia; puede, en efecto verificarse que la primera obra de la secuencia colmata, de lugar a dañinas inundaciones, mientras los volúmenes traseros de los diques aguas abajo permanezcan totalmente en buena parte inutilizados (Milano, 2003).

En el caso de diques con función de retención es indispensable realizar las obras en sitios con idóneas características orográficas, donde sea posible embalsar volúmenes relevantes sin recurrir a valores elevados de altura de las obras. También en estos casos las ordenaciones de las vertientes, finalizada a la reducción del aporte sólido al torrente, representa un elemento indispensable cuando no están disponibles sitios para la construcción de diques capaces de

contener una alícuota relevante del transporte sólido que se verifica durante la avenida con carácter excepcional.

La fase de diseño y proyecto deberá por lo tanto individualizar un sitio que permita recavar, con la barrera de la sección fluvial mediante el dique abierto, un volumen en el cauce aguas arriba del dique confrontable con aquel del material sólido que atraviesa la sección de la barrera en el intervalo de tiempo comprendido entre dos sucesivos vaciados de la zona de depósito aguas arriba de la obra (Maione, 1998).

3.6 MOTIVACIONES QUE IMPULSARON LA CREACIÓN DE LOS DIQUES ABIERTOS

En los últimos decenios se ha asistido a una notable evolución técnico-constructiva y a un empleo más razonable de los materiales (Puglisi, 1972, 1973, 1977). Así pues, las obras en madera y piedras en seco fueron primero reemplazadas en obra de mortero, después de hormigón simple y de hormigón armado. Los diques de consolidación de tipo tradicional, que se construyeron previendo amplios orificios de drenaje (a veces también de dimensiones no propio transcurables), frente al alcance de algunos objetivos de la ordenación (fijación de la cota del cauce a un nivel preestablecido, apoyo del pie de una vertiente inestable, etc.) han presentado en el tiempo algunos inconvenientes:

- Impacto sobre el territorio debido, no a la simple obra, pero si a la sucesión de obras necesarias para la obtención óptima del objetivo propuesto;
- Incapacidad de efectuar una selección de los materiales transportados por la corriente, “en el sentido de retener aquellos dañinos al régimen del curso de agua y de dejar pasar los otros” (Puglisi, 1967);
- Retención de material de pequeñas dimensiones y en grado de desarrollar una función no transcurable en la alimentación “sólida” del torrente aguas abajo del tramo ordenado;
- Inadecuación de los diques de retención a la descarga de eventos de avenida que dan lugar a transporte de sedimento a fuerte “impacto” sobre la obra, sea bajo el aspecto dinámico sea bajo el aspecto de volúmenes que deberían ser interceptados (corrientes hiperconcentradas, coladas detríticas).

Los inconvenientes pueden convertirse en más relevantes aún cuando, para obtener la retención del material sólido, se realiza un dique en una posición que determina aguas arriba la formación de una amplia zona de acumulación. Para tales obras se verifican en efecto lo siguiente:

- La reducción del volumen útil a la retención de los sedimentos durante las avenidas ordinarias; de tal modo que al verificarse los sucesivos eventos aluvionales a carácter de mayor excepcionalidad la capacidad del embalse puede resultar sensiblemente reducida si no anulada;
- La necesidad de tener que efectuar frecuentemente un vaciado de la obra para restablecer la funcionalidad;
- La corriente en salida del dique se presenta con una modesta carga sólida y por lo tanto capaz de erosionar el cauce fluvial aguas abajo;
- Descenso del perfil de fondo de los grandes cursos de agua por falta de una suficiente alimentación sólida; el fenómeno puede también ser dañino, en cualquier medida, para la conservación de los litorales; estos últimos, en caso de retroceso, deben ser abastecidos artificialmente de arenas para mantener su función turístico-balnearia.

Por las razones mencionadas, a partir de los años 50, se inició, en varios países europeos, un proceso de revisión crítica de las técnicas de ordenación tradicional, que concernió sea los aspectos funcionales sea aquellos más estrechamente económicos. En este periodo, con el advenir de grandes máquinas operadoras (excavadores, retro-excavadores y camiones de carga de gran potencia) asociado al contemporáneo aumento del costo de la mano de obra especializada, se asiste a una disminución del coste de las excavaciones, de los transportes y de otras operaciones de cantera. Simultáneamente se adoptaron métodos constructivos precursores de alta productividad, poco costosos y acoplados a nuevas concepciones ingenierísticas y de organización del trabajo, decretando de tal modo la decadencia de los tipos más tradicionales de diques y en particular de las obras de retención a parámetro lleno y de altura elevada. Todo esto llevó a una gradual introducción en la práctica profesional y constructiva de obras especiales que fueron realizadas considerando una abertura central, en el cuerpo del dique, en la cual venía inserido un filtro (pared enrejada) teniendo la función de operar, como un tamiz, una selección granulométrica del material transportado.

Los conceptos que empujaron a idear y utilizar estas obras, que fueron denominadas filtrantes o también abiertas o selectivas, son los siguientes:

- Caída de los costes sostenidos en los materiales de construcción, dado que respecto a un dique tradicional su volumen era netamente inferior;
- Mayor duración funcional de un dique abierto de retención que, propio por la geometría asignada al filtro central, permite que pase sólo el sedimento fino;
- Rapidez en la realización con consecuencia en la economía de los materiales, mano de obra y trasportes;
- Aligeramiento de la fuerza a dorso de los mismos diques; se hipotizó además que, insertando una o más rendijas en el cuerpo del dique, las aguas mixtas de tierra y fango dejaran en el embalse aguas arriba solo guijarros y grandes piedras, las cuales, depositándose en modo compacto y estable, limitaban los peligros de eventual rotura de la traviesa (Poggiolini, 1961);
- Laminación del caudal sólido vehiculado aguas abajo de la obra que, durante el evento aluvional, es responsable de daños bien mayores de aquellos provocados por el caudal líquido;
- Capacidad de parcial vaciado de la plazoleta de acumulaciones de los sedimentos aguas arriba del dique durante avenidas ordinarias o con caudales moderados (proceso de autolimpieza);
- Posibilidad de obtener beneficios inmediatos en la intervención. En las pequeñas cuencas montañas con conoide urbanizado la construcción de una obra abierta posicionada en el ápice del cono de deyección permite reducir el riesgo aluvional, permitiendo así solo en una fase sucesiva la ordenación capilar de las zonas aguas arriba favoreciendo de consecuencia la dilución de los esfuerzos técnico-económicos en el tiempo.

3.7 EJEMPLOS DE DIQUES ABIERTOS

En los diques filtrantes de primera concepción, la retención “selectiva” del material era atribuida únicamente a la acción mecánica por criba ejercitada de la serie de troneras y rejillas

en acero constituyentes el filtro. A partir de las primeras experiencias significativas, relativas a los prototipos de Poncet (1960) y Genet (1953), fueron investigadas nuevas soluciones pero todas reconducibles a la concepción de retención selectiva de los sedimentos transportados de la corriente.

Poncet (1960) ideó una obra constituida de un rodapié en cemento armado (Fig. 3.2) monolítico y encastrado en las orillas, y de dos alas realizadas esas también en hormigón armado, apoyadas sobre el rodapié y encastradas a las orillas de la sección transversal, considerando una altura total de la obra de 12 m. El cuerpo del dique se dejó vacío para consentir la colocación del dispositivo filtrante. El remate de este filtro, en correspondencia del vertedero, fue revestido con viejos rieles ferroviarios dispuestos inclinados aguas arriba hacia la corriente.

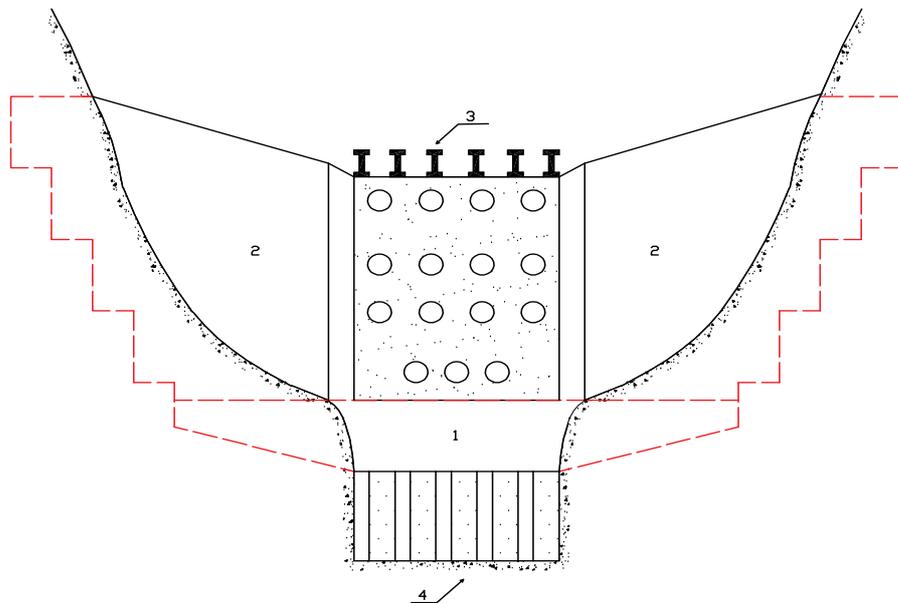


Figura 3.2 - Obra constituida de un rodapié en cemento armado (Poncet, 1960).

En el 1953 fue propuesto por el Ingeniero Genet un tipo de dique filtrante, denominado a rastrillo, el cual en la zona abierta está presente una fila de dientes, realizados por ejemplo con elementos cilíndricos en acero (Fig. 3.3). El dispositivo central crea un filtro que tiene la doble finalidad de detener sólo el material de mayor dimensión y de fraccionar la corriente líquida que llega. En el 1955 Genet patentó un nuevo tipo de dique filtrante que presenta una reja inclinada hacía aguas abajo, o vertical encastrada en las alas de la obra. El intervalo de los

elementos constituyentes el dique filtrante, es establecido en relación a la retención mecánica del material grueso de asignado diámetro. En otros términos, el filtro viene realizado mediante un reja inclinada hacía aguas abajo o vertical que tiene la finalidad de operar, funcionando como un tamiz, una selección granulométrica del material transportado por la corriente (Ferro y Otros, 2004). El dique tipo Monnet, en los años sesenta, (Monnet, 1960; 1966) fue realizado mediante una plantilla que venia anclada a un red metálica suspendida superiormente a un cable tensado entre las dos orillas: la red estaba dispuesta de modo que resultase inclinada sobre el horizonte de un ángulo igual a aquel de reposo de los materiales aterrados. Según la intención del proyectista las solicitación a las cuales fue sometida la obra después del aterramiento eran independientes de la altura de la obra (esto ocurre obviamente por las condiciones de equilibrio en las cuales viene a encontrarse el material aterrado recostado sobre el filtro).



Figura 3.3 - Dique filtrante denominado a peine o a rastrillo (Genet, 1953).

En el dique Clauzel el elemento filtrante es sub-horizontal y el aterramiento ocurre aguas abajo en lugar de aguas arriba del dique. En práctica se pone en obra sobre el curso de agua una clase de dique de derivación delimitada por dos muros longitudinales de aducción. En este

modo la corriente carga materiales sólidos o también coladas detríticas que pierden, al paso sobre el dique, su contenido de agua que viene restituido al cauce tramite un canal de derivación que tiene inicio debajo del dique; la fracción sólida de la corriente viene a su vez depositada sobre un área de acumulación predispuesta aguas abajo del dique. El dique Clauzel puede dar lugar a inconvenientes en el caso de obstrucción del canal de derivación o de oclusión de las aberturas entre los espacios del dique. En tal ocasión parte del sedimento precedentemente depositado en la explanada de acumulación puede ser remobilizado frustrando los objetivos de intercepción del material sólido. En el dique Clauzel se inspira el dispositivo ideado por Puglisi (1968), para la ordenación de algunos torrentes del Apenino Lucano (Italia). El susodicho dispositivo derivado está constituido por un dique en el cual el vertedero, aguas abajo del muro frontal de la obra, dispone de una reja a doble pendiente que tiene la finalidad de separar los materiales gruesos de la corriente y de las partículas pequeñas. El material sólido grueso, después de la súbita paracentesis en el tramo de la rejilla a pendiente menor, prosigue su movimiento hacia la zona de acumulación aguas abajo del dispositivo, mientras el agua y las partículas que atraviesan el dique se recogen en la cámara de la cual vienen alejadas mediante un canal y entregadas en un curso de agua limítrofe. La inclinación del segundo tramo del dique permite recoger en el curso de agua principal el caudal excedente. En efecto, en el caso en que el caudal de la corriente de llegada en el curso de agua principal supere el caudal máximo relativo a la sección terminal del canal, el remanso de la corriente determina un cruce de la misma en la zona terminal de la rejilla. Las pruebas sobre el modelo han evidenciado que la configuración a doble pendiente de la rejilla provoca, en el caso de los caudales modestos de la corriente de llegada, la retención del material sólido en el tramo inicial de la rejilla, y da lugar a la formación de acumulaciones de difícil eliminación. Por esta razón a la rejilla le ha sido dada una única pendiente, y precisamente aquella máxima, y también el cuerpo del dique ha sido realizado de tipo filtrante para favorecer la selección granulométrica (Ferro y *Otros*, 2004).

Conceptualmente, bastante similar al dique Clauzel es el dique inventado por Rosic, (1956) de la Universidad de Belgrado (Cappuccini, 1957). Tal dispositivo se basa siempre sobre un drenaje con un filtro de tipo horizontal, el cual es realizado haciendo preceder a un dique de consolidación de tipo tradicional, y de altura más bien modesta ($2\div 3$ m), de una galería filtrante de longitud del orden de 10 m. La galería “filtrante” viene puesta en obra ortogonalmente al vertedero y (partiendo de la cuota del plano del mismo vertedero) alcanza

una profundidad de cerca o igual a la altura de la obra, consintiendo en crear un aterramiento poroso a monte. Las aguas drenadas de la galería vienen obviamente restituidas aguas abajo de la obra a través de un elemental alcantarillado subterráneo (Ferro y *Otros*, 2004). Grac (1964) fue el primero en proponer un dique totalmente realizado con perfiles de acero que van a formar un filtro a cañizo: se trata de una estructura reticular más bien ligera y marcada de una fuerte permeabilidad. Según una idea de Monnet (1960) de la “reacción a cadena”, como el inicio del movimiento de cualquier canto rodado origina, por los choques resultantes, los movimientos de otros cantos rodados (cadena de movilizaciones), así la retención inicial de una parte de los sedimentos en movimiento determina, progresivamente, la retención del transporte sólido en el acto. De la explicación de este concepto descende que también un filtro estructuralmente muy liviano, como por ejemplo aquel del mismo dique de Monnet en red metálica, es suficiente, una vez encaminada la intercepción de los sedimentos, a determinar un tipo de autoconstrucción (Poggiolini, 1961; Puglisi, 1967) del dique (Ferro y *Otros*, 2004).

Con las obras apenas ilustradas se empieza también a prospectar la posibilidad que estas aseguren el tránsito de los “transportes parciales” de sedimento e impidan los “transportes de masa”; es decir las coladas detríticas y de fango (Passerini, 1957). Esto es, para la ordenación montana, un concepto del todo nuevo sobre la gestión del transporte sólido que impone la renuncia a la regularización de los eventos de avenida ordinarios, o poco más que ordinarios, para controlar en cambio los eventos aluvionales precursores de mayor daño y destrucción. Obras reticulares con filtros muy amplios, sobre el tipo de aquella propuesta originariamente por Grac, comienzan a consolidarse en la práctica de ordenación de muchos países europeos, entre ellos: Rumania, Eslovenia, Rusia, Japón, Austria (Kroffellner-Kraus, 1972). Las aberturas fueron generalmente dimensionadas en modo de resultar casi igual a 1-2 veces el diámetro máximo de los detritos que se consideraba podían ser recogidos aguas abajo de la obra.

3.7.1 DIQUES ABIERTOS EN ITALIA

En Italia se empezó a hablar de diques filtrantes en el sentido estrecho de la palabra en torno al 1955 sobre el impulso de los progresos obtenidos en territorio francés, mientras que las primeras experiencias se remontan a la primera mitad del los años sesenta sobre algunos torrentes del Apenino Lucano (Puglisi, 1968). Las primeras obras fueron realizadas construyendo la parte filtrante con elementos horizontales (rieles, vigas, traviesas prefabricadas en cemento armado) oportunamente espaciados y anclados a la parte del muro.

Estos diques se presentan en forma diversa y en general pueden ser agrupados de la siguiente forma:

- *Con alcantarillas y/o ventanas*, en este caso pueden presentarse una o más alcantarillas rectangulares o circulares, situadas en el cuerpo del dique, debajo de la cubeta o vertedero (Fig. 3.4).

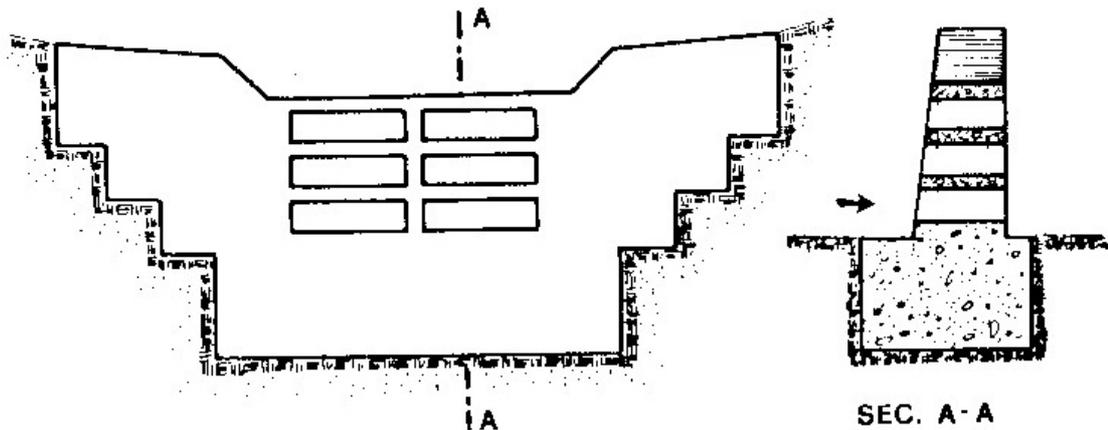


Figura 3.4 - Dique con alcantarillas o ventanas múltiples (fuente: AIDI-IILA, 1983).

- *A fisura, hendidura, rendija o cuña*, en los cuales la parte central del vertedero está formado por una estrecha y profunda hendidura a rendija, con paredes ligeramente inclinadas que llegan o se acercan al fondo del lecho (Fig. 3.5).

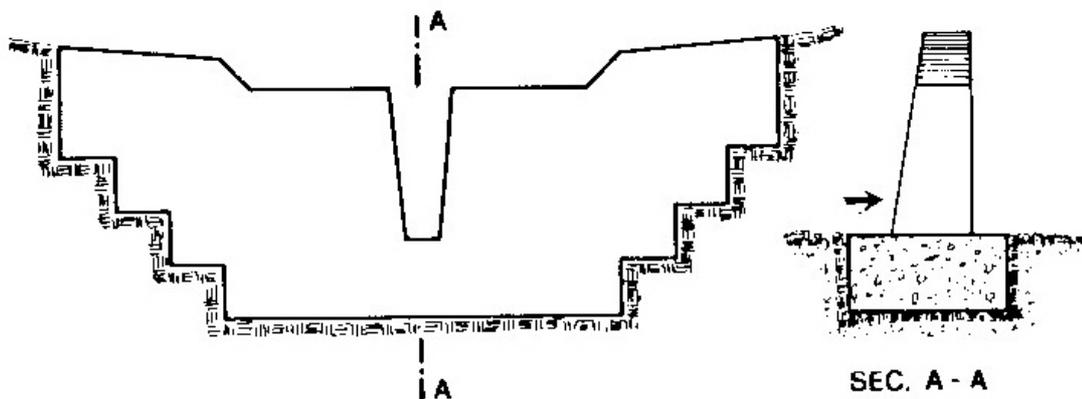


Figura 3.5 - Dique abierto a fisura o hendidura (fuente: AIDI-IILA, 1983).

- *Reticulares (o con rejas)*, formados generalmente por un retículo de perfiles de hierro de malla grande, que constituyen la parte central del dique, anclados en una zapata robusta y en las alas de la obra. A veces el retículo puede ser substituido por una simple reja de elementos horizontales o verticales, los cuales pueden ser de acero o de hormigón armado (Fig. 3.6).

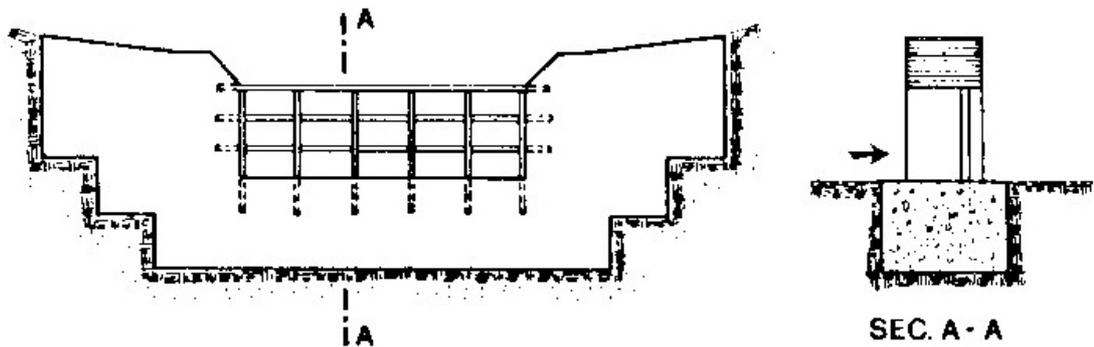


Figura 3.6 - Dique abierto reticular o con rejas (fuente: AIDI-IILA, 1983).

- *Tipo rastrillo con piezas verticales (a peine)*, formado por una serie de perfiles de caños verticales de acero, encastrados en una zapata de hormigón, y desligados superiormente (Fig. 3.7).

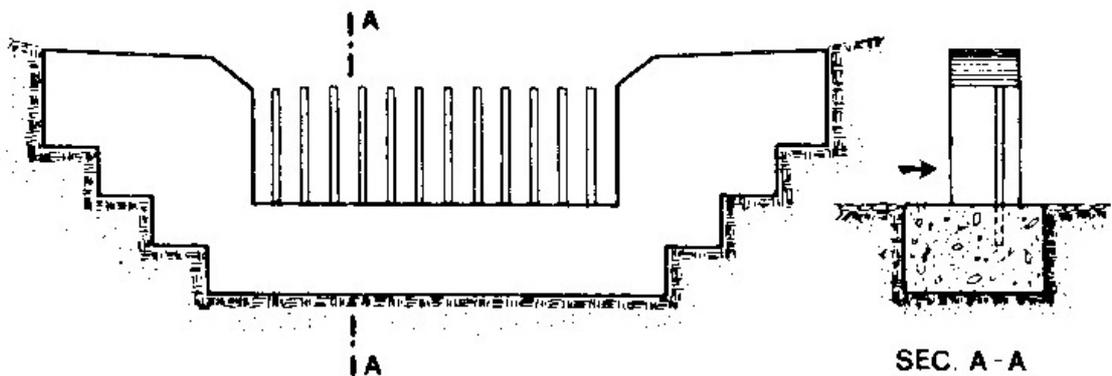


Figura 3.7 - Dique tipo rastrillo con piezas verticales (a peine) (fuente: AIDI-IILA, 1983).

- *A enrejado*, constituidos por una armadura de elementos modulares (comúnmente en acero, pero también en hormigón armado) apoyados directamente en el fondo y en las

laderas del torrente (Fig. 3.8). A este tipo pueden también asimilarse los diques-redes, formados simplemente por el entrelazamiento de cables de acero amarrados o anclados a las laderas del valle.

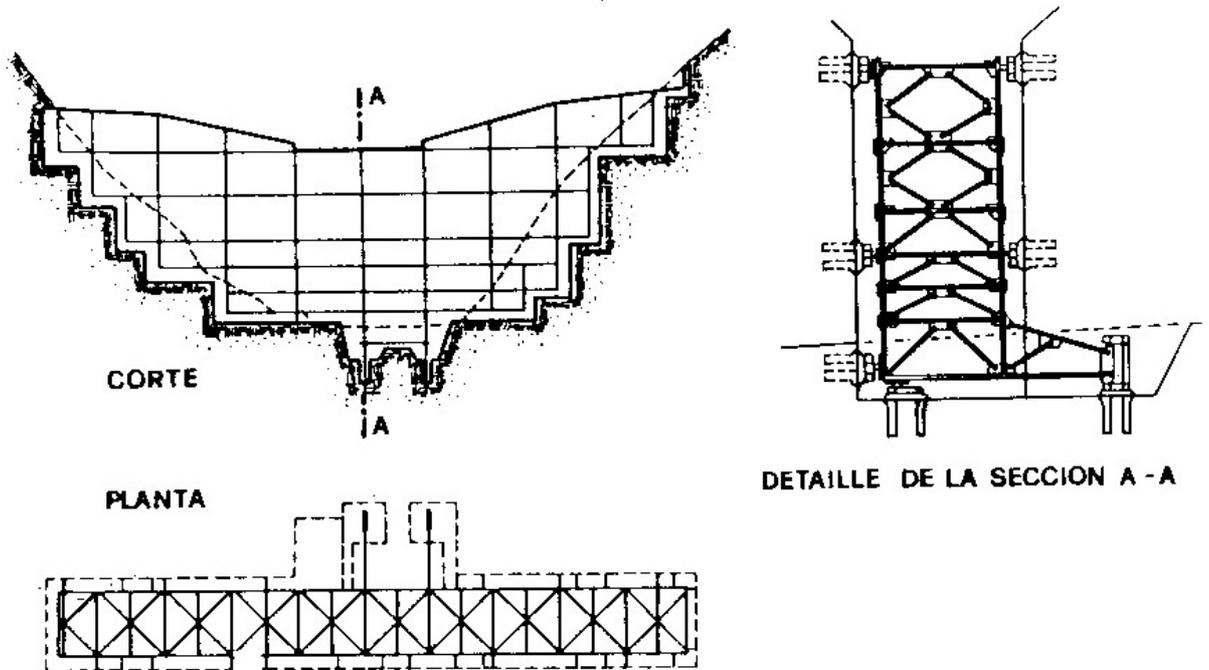


Figura 3.8 - Dique tipo enrejado (fuente: AIDI-IILA, 1983).

De todas formas el objetivo esencial de los diques con alcantarillas y/o ventanas es el de contener en manera diferencial los materiales transportados por el torrente. La diversidad de formas depende de la modalidad con la cual vienen retenidos tales materiales y de las características de éstos.

Los diques con alcantarillas y/o ventanas y a fisura presentan un comportamiento análogo. Vienen empleados por lo general como diques de retención, con la finalidad de detener el material sólido más grueso, dejando pasar aguas abajo el material de menores dimensiones.

Para lograr dicho objetivo la fisura o las ventanas deben ser dimensionadas en manera tal que la sección total sea insuficiente para descargar la totalidad del caudal de crecidas que provocan un notable transporte sólido. En ocasión de dichas crecidas el nivel del agua debe, por lo tanto, superar el umbral del coronamiento del vertedero. Aguas arriba se forma un

remanso que provoca, momentáneamente, una notable disminución de la velocidad de la corriente y por ende, depósito del material de media y grandes dimensiones. Después de la crecida, los caudales normales y de estiaje pueden ser encauzados a través de las ventanas abiertas en el cuerpo del dique o de la fisura central. Se forma así una corriente rasante en grado de transportar hacia aguas abajo los materiales de dimensiones media y fina, dejando en el lugar sólo el material más grueso. Se logra de esta manera una doble ventaja; el volumen del vaso destinado a la retención del material viene utilizado mejor, ya que es reservado, fundamentalmente, al material grueso; es decir, al material que específicamente se debe contener. Luego, el material sólido es transportado aguas abajo gradualmente, impidiendo así su peligrosa concentración durante las avenidas.

Los diques reticulares y los tipo rastrillo con piezas verticales (a peine), vienen en cambio empleados, en general, como diques de consolidación. La zapata funciona como umbral y fija así la corrección del torrente; la parte central filtrante tiene la finalidad, además de aquella de contener grandes piedras, de detener el material flotante (troncos, tocones de árboles, raigones y ramas). Es ésta una función importantísima, puesto que este tipo de materiales, al encastrarse en estrechamientos, luces de puentes, etc., pueden formar en el lecho represamientos u obstrucciones provisionarias, que al ceder, agravan las condiciones de la crecida.

Los diques a enrejado y los diques redes tienen fundamentalmente la misión de detener el material flotante. Para que las características funcionales de los diques abiertos no se alteren con el correr del tiempo, se requiere una continua manutención, especialmente después de las grandes crecidas, y no sólo de tipo conservativo sino también operativo, a efectos de remover y de retirar el material leñoso encastrado y los grandes bloques de piedra que obstruyen las aberturas y el cauce. Por lo tanto, debe preverse que aguas arriba de estas obras se pueda acceder con grandes máquinas de movimiento de suelos.

El primer dique abierto a ventana construido en Alto Adige remonta el 1961 (Dragogna, 1970) y fue construido sobre el torrente Sesto (Alta Pusteria), considerando una sola ventana central (Fig. 3.9). Esta obra ha funcionado perfectamente durante los eventos aluvionales del 1965-1966, salvando el pueblo aguas debajo de Moso.

Uno de los primeros diques filtrantes a ventana múltiple realizada en Italia ha sido construido, siempre en Alto Adige, sobre el torrente Pudio; esta obra ha previsto bien, doce

ventanas rectangulares (Fig. 3.10) y ha sido completada en el 1969 para defender el pueblo aguas abajo de Monguelfo, duramente golpeado por el aluvión del 1966.

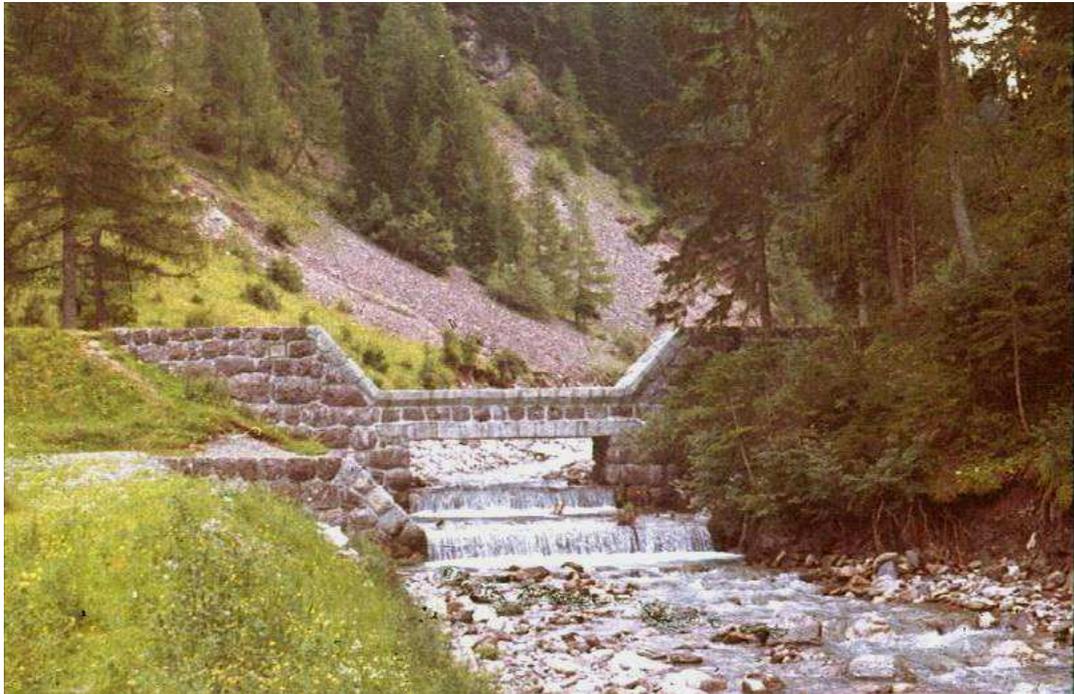


Figura 3.9 - Primer dique a ventana en Italia.

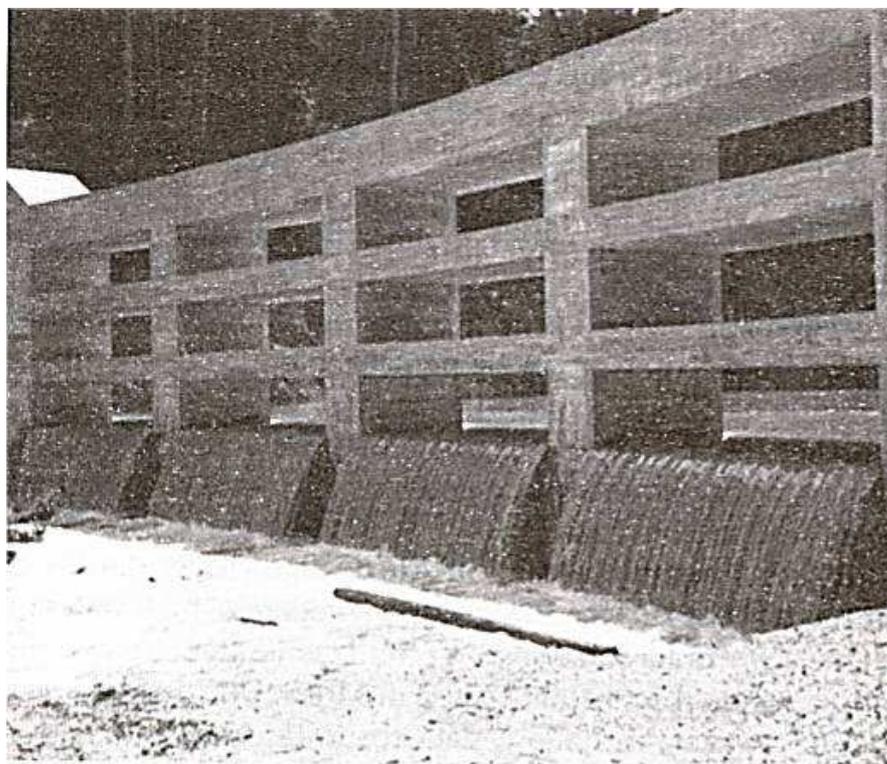


Figura 3.10 - Dique filtrante a ventana múltiple.

En el periodo inmediatamente sucesivo al aluvión de 1966, que ha interesado en modo relevante gran parte del territorio de la provincia de Belluno y de Trento, han sido construidas también en estas zonas numerosas obras abiertas. En el caso en cuestión han sido construidas obras constituidas por ventanas múltiples (Fig 3.11), filtro reticular con rejas horizontales (Fig. 3.12) o verticales (Fig. 3.13) y diques a hendiduras (Fig.3.14).



Figura 3.11 - Dique abierto a ventanas múltiples en el Fiume Isarco (Alto Adige).



Figura 3.12 - Dique abierto con rejas horizontales (Río Civerton, Trento).



Figura 3.13 – Dique abierto a rastrillo con piezas verticales en el Torrente Fiorentina (Caprile, Region Veneto).



Figura 3.14 - Dique a fisura o hendidura (Rio Maè, Belluno, Región Veneto).

Con el tiempo se ha podido constatar como la funcionalidad hidráulica de estas primeras obras abiertas estuvieran afectadas por el atarquinamiento, y sobretodo por la compactación del sedimento depositado aguas arriba (Fig.3.14).

La valoración de la problemática específica que caracterizaba cada torrente ha llevado a un estudio más específico y el diseño de obras de tipo abierto comenzó a ser efectuada con una mayor sensibilidad del proyectista hacía las funciones específicas que debe cumplir el dique selectivo. Esta “nueva visión“, por cuanto sea difícil definir una neta división entre obras de la “primera” y de la “segunda generación”, se puede idealmente colocar en torno de los años 70. En este sentido, ejemplos interesantes de obras filtrantes realizadas en Italia se deben por ejemplo a Fattorelli (1972) y a Fattorelli y Mazzalai (1982), y serán tratadas en el próximo capítulo.

3.8 BIBLIOGRAFÍA

AIDI-ILLA (1983), *Manual para el diseño de diques de correccion de torrentes*. Publicaciones del Instituto Italo-LatinoAmericano, Roma.pp. 127.

Andrich A., D’Agostino V. (2000), Curabilità ed economia degli interventi, in *Le opere in legno nella sistemazione dei torrenti montani*, Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto (A.R.P.A.V.), Centro Valanghe di Arabba, 123-135.

Benini G. (1990), *Sistemazioni idraulico-Forestali*, UTET, Torino.

Cappuccini G. (1957), Nuovo sistema per la correzione dei torrenti in esperimento in Jugoslavia, *Monti e Boschi*, VIII, 1, pp. 17-20.

Cola R. (1970), Sul funzionamento delle briglie selettive, *Rassegna Tecnica del Friuli-Venezia Giulia*, 5, pp. 3-10.

D.M. 20.08.1912, Aprovazione delle norme per la preparazione dei progetti dei lavori di sistemazione idraulico-forestale dei bacini montani, Ministero del Lavori Pubblici, Roma.

- D'Ambros E. (1994), Opere in pietrame e legname, Atti del Corso di Formazione Professionale in Ingegneria Naturalistica, Regione del Veneto, Dipartimento Foreste, Centro Valanghe di Arabba.
- Dalla Giacoma F., Ferrari L., Armanini A. (1989), From the check dam to the development of functional check dams for a most effective torrent control, Atti dello *International workshop on Fluvial Hydraulics in Mountain Regions*, Trento, 3-6 October, B 169-B 182.
- Di Tella G., Bay F.(1946), *Le sistemazione dei bacini montani*, Ed. Agricole, Bologna.
- Dragogna G. (1970), *La briglia selettiva di salvaguardia*, Il Frantoio, VII (9), p. 5.
- Fattorelli S. (1972), Tipo sperimentale di briglia a contrafforti, *Monti e Boschi*, 5, pp. 15-22
- Fattorelli S., Mazzalai P. (1982), Sistema integrato di piazza di deposito e broiglia a funi per la regolazione del torrente Sarca, *Economia Montana*, XIV (3), pp. 3-7.
- Ferro V. (1990), Un criterio di dimensionamento per le briglie selettive a reticolo con elementi trasversali. Ricerca sperimentale, *Rivista di ingegneria Agraria*, vol. XXI, 4, 225-240.
- Ferro V. (2002), *La sistemazione dei bacini idrografici*, Mc Graw Hill, Milano, 676 pp.
- Ferro, V., Dalla Fontana, G., Pagliara, S., Pugliesi, S., Scotton, P., 2004. *Opere di sistemazione idraulico-forestale a basso impatto ambientale*. Edizioni Mac-Graw-Hill.
- Fiebiger G. (1986), Bedload management on torrent control by functional check dams, *Beitrage zur Wildbacherosions und Lawinenforschung*, Mitt. Der FBVA, vol. 159, 325-332.
- Genet E. (1953), Un nouveau type de barrage de correction: le barrage-peigne, Compte rendu général du voyage d'études dans les Alpes Française du Groupe de Travail FAO/EFC/TORR, 1° session, 1952, Nancy.
- Grac L. (1964), Correction d'un petit torrent par uvrages légers, Documents FAO/EFC/TORR, 1.

- Kronfellner – Kraus g. (1972), Neue Bauweisen in der Wildbach- und Lawinenver- baunung in internationaler Sicht, *Centralblatt fur das Gesamte Forstwesen*, 89(1), pp. 33-57.
- Larcher M., Armanini A. (2000), Dimensionamento della larghezza dell'apertura delle briglie a fessura, *Atti del XXVIII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Genova, vol. I, pp. 289-297.
- Lenzi M.A., D'Agostino V., Sonda D. (2000), *Ricostruzione morfologica e recupero ambientale dei torrenti*, Bios, Cosenza, 208 pp.
- Maione U. (1998), *La sistemazione dei corsi di acqua montani*, Editoriale Bios, Cosenza.
- Milano V. (2003), Criteri di progettazione delle briglie selettive a fessura, *Atti del XXIV Corso sulle Tecniche di difesa dall'inquinamento*, Editoriale Bios, Cosenza.
- Monnet P. (1960), La lutte contre l'inondation doit être préventive et non curative, *La technique de l'Eau et de l'Assainissement*, 3.
- Monnet P. (1966), Une expérience de correction torrentielle donnerait-elle la clé du phénomène de transports solides par les eaux courantes? *Revue de Géographie Alpine*, 43, pp. 455-460.
- Passerini G. (1957), Per la difesa degli abitati dai "trasporti di massa", *L'Acqua e il Suolo*, IX, 1, pp. 40-60.
- Poggiolini, G. (1961), Briglie filtranti nella sistemazione dei torrenti, *L'Acqua e il Suolo*, XIII, 1, pp. 28-31.
- Poncet M. A. (1960), Note sur les tendances actuelles manifestées en France dans la conception et la réalisation des barrages de correction torrentielle, dans la correction des Torrents, *FAO/EFC/TORR*, 5° session.
- Puglisi S. (1967), L'impiego dei dispositivi filtranti nella correzione dei torrenti. Nota introduttiva, *L'Italia Forestale e Montana*, XXII, 1, 12-24.
- Puglisi S. (1968), Resoconto delle esperienze in corso con dispositivi filtranti in alcuni torrente dell'Appennino Lucano, *L'Italia Forestale e Montana*, Vol.XXIII, 6, pp.26-73.

- Puglisi S. (1972), Briglie aperte e prefabbricate, Opere per la correzione dei torrenti. Moderne tecniche costruttive e nuovi procedimenti di calcolo, Ministero dell'Agricoltura e delle foreste, Collana Verde, 29, Roma, pp. 133-145.
- Puglisi S. (1973), Barrage à claire-voie et préfabriqués, Mitteilungen der forstlichen Bundes – Versuchsanstalt Wien, 102 Helft, pp. 253-271.
- Puglisi S. (1977), Caratteri degli interventi di sistemazione idraulico-forestale, In Bagnaresi, U., Suggelli, A., Pugliesi S., *La sistemazione del suolo nei territori montani*, Ed agricole, 29-45.
- Puglisi S. (2003), Attualità delle sistemazioni idraulico-forestali in un mondo che cambia, *Annali della Accademia Italiana di Scienze Forestali*, vol. LI.
- Rosic S. (1956), Quelques exemples de l'extinction spontanée des torrents, *Revue Forestière Française*, VIII, 7, pp. 512-522.
- Zolin G. (1995), Impatto ambientale delle briglie filtranti, *L'Italia Forestale e Montana*, L, 3, pp. 329-340.

EPIC FORCE - UNIPD *El control de detritos leñosos y el manejo de la vegetación en el cauce*

Lenzi M.A., Comiti F., Mao L., Andreoli A., Pecorari E., Rigon E., Picco L.

4 DIQUES SELECTIVOS Y ESTRUCTURAS EXPERIMENTALES DE RETENCIÓN DE DETRITOS LEÑOSOS

4.1 INTRODUCCIÓN

El estudio de las obras abiertas para la retención del material sólido ha tenido en cuenta principalmente el caudal sólido constituido principalmente de material inerte sólido. En los últimos años se ha difundido, todavía más, a causa de eventos extremos de avenidas, la necesidad de estudiar también soluciones respecto a la captura de material vegetal en el interior del cauce. La presencia de vegetación, en particular de detritos leñosos, *Large Woody Debris* (LWD), ha causado a menudo daños muy graves y representa aún hoy argumento en la investigación científica.

Los *Large Woody Debris*, que en zonas montañas son a menudo definidos *Coarse Woody Debris* (CWD), son, en efecto, causa de grandes obstrucciones, erosiones locales del lecho del río y de las orillas y pueden aumentar mucho la rugosidad hidráulica y como consecuencia el pico de máximo caudal a lo largo del río (Abbe y Montgomery, 1996). Grandes cantidades de CWD aumentan las posibles áreas sujetas a las riadas, y, en general, el grado de riesgo de estas áreas. La principal razón de los daños causados es la falta de una adecuada proyectación y diseño de las estructuras hidráulicas (diques, puentes, canales) en relación al potencial de flujo de los CWD. A menudo, en cursos de agua caracterizados de una enorme cantidad de detritos leñosos, la única solución practicada es la captura de los CWD aguas abajo del punto crítico mediante un dique abierto. Las aberturas utilizadas (ventanas o fisuras) están a menudo asociadas a diques inclinados. En ambos la elección del filtro depende de la principal función del proyecto (Tab. 4.1).

En este sentido es necesario subrayar que el comportamiento dinámico de los troncos durante una avenida es diferente respecto a aquel de los sedimentos transportados. La forma y la densidad de los elementos son diferentes, los volúmenes arrastrados y las condiciones de alimentación son mucho más heterogéneos y también la alteración física del material acumulado en el cauce puede influenciar la modalidad de transporte.

A menudo, la fuerza hidrodinámica excede el límite elástico-plástico de la madera y rompe los elementos más largos. Uchiogi y Otros (1996) han evaluado que la actividad de

CWD puede aumentar de hasta el 20% la fuerza hidrodinámica convencional (agua clara sin sedimentos)

| CARACTERÍSTICAS DEL FILTRO | COMPORTAMIENTO | CAMPO DE EMPLEO |
|--|--|---|
| Fisuras formadas de elementos horizontales | Facilidad de obstrucción y breve duración de la función | Predominio de la función de retención |
| Fisuras formadas de elementos verticales | Mayor selectividad y capacidad de auto vaciado. -facilidad de obstrucción en presencia de troncos | Obras con predominio de la función de selección y laminación del transporte |
| Inclinación del filtro: -única inclinación -más de una inclinación | Obstrucción difícil con mantenimiento de la funcionalidad selectiva y de laminación. | Obras que deben mantener la función de selección y laminación lo más largo posible durante el evento de avenida Obras de retención de detritos flotantes |
| Contrafuertes a monte | Obstrucción difícil con mantenimiento de la funcionalidad selectiva y de laminación | Obras rompe coladas |

Tabla 4.1 - Características del filtro, comportamiento y campo de empleo (Fuente: Ferro y Otros, 2004).

Estas observaciones han llevado a considerar importante el estudio del fenómeno de los troncos en el cauce, sobretodo en el escenario del diseño y proyecto finalizado al control de los torrentes y al uso de diferentes tipologías de diques, que han sido de consecuencia de tipo experimental. La funcionalidad hidráulica, de hecho, de las primeras obras abiertas a menudo se veía comprometida por el atarquinamiento, pero sobretodo por la compactación del sedimento depositado aguas arriba. En este proceso de compactación el material flotante (troncos, ramas, material quebrado) tiene un rol de primera importancia en cuanto, acumulándose desordenadamente al abrigo de los filtros, favorece el depósito de los sedimentos más finos. Todo eso provoca un tipo de “cementación” de todo el volumen acumulado aguas arriba del dique disminuyendo, o más a menudo impidiendo, el proceso de

autolimpieza de la obra durante las avenidas ordinarias y obligando a los encargados de los trabajos, onerosas operaciones de mantenimiento. Esto ha llevado a diferentes estudiosos a buscar obras siempre más específicas, adaptando las soluciones también al problema y a las características del torrente tratado. Una “nueva generación” de diques filtrantes nace en los años 70, y a causa de esta nueva y mayor sensibilidad, los nuevos proyectos comenzaron a tener las funciones esperadas de dique selectivo (Ferro y *Otros*, 2004). En esta óptica se desarrollaron diferentes tipologías de diques en diferentes partes del mundo, utilizando diferentes experiencias, de campo y de laboratorio. En este capítulo se cita una panorámica sobre algunas de las obras tipo hasta ahora construidas a fin de poder valorar la utilidad de las mismas, su funcionalidad y los posibles desarrollos futuros.

4.2 DIQUES CON CONTRAFUERTE

Entre las diferentes tipologías de diques propuestos en Italia, Fattorelli (1972) ha ideado, sobre las experiencias citadas en la literatura alemana (Kronfellner-Kraus, 1970), un dique abierto a contrafuertes con perfil de aguas arriba a escalón y con la parte filtrante realizada por medio de vigas horizontales en cemento armado y/o en cemento armado pre-comprimido (Fig. 4.1, 4.2 y 4.3). La manejabilidad de este tipo de dique está en la simplicidad de los vínculos de apoyo a los escalones de los contrafuertes que crea las premisas para una cierta *modulación del filtro* y permite una ágil sustitución de los elementos del filtro en caso de desgaste o daño. Es posible que, no obstante en los intentos del proyectista, un determinado filtro se comporte, en las consideraciones del transporte sólido, en modo demasiado selectivo o también que, al contrario, haga sentir su efecto en modo demasiado poco frecuente respecto a la necesidad de regulación del transporte sólido aguas abajo. En ambos casos, mediante simple eliminación de algunos elementos del filtro, en el caso de excesiva selectividad, o la introducción de nuevos elementos, en el caso de moderada acción selectiva, es posible regular el funcionamiento de la obra en tiempos sucesivos a su realización.

La obra filtrante a contrafuertes presenta además la no despreciable ventaja estática de soportar eventuales asentamientos no uniformes del plano de cimentación; la solución constructiva de los contrafuertes independientes da al dique una buena elasticidad estructural, asegurando al mismo tiempo, una satisfacción de la resistencia a la acción erosiva del transporte sólido.

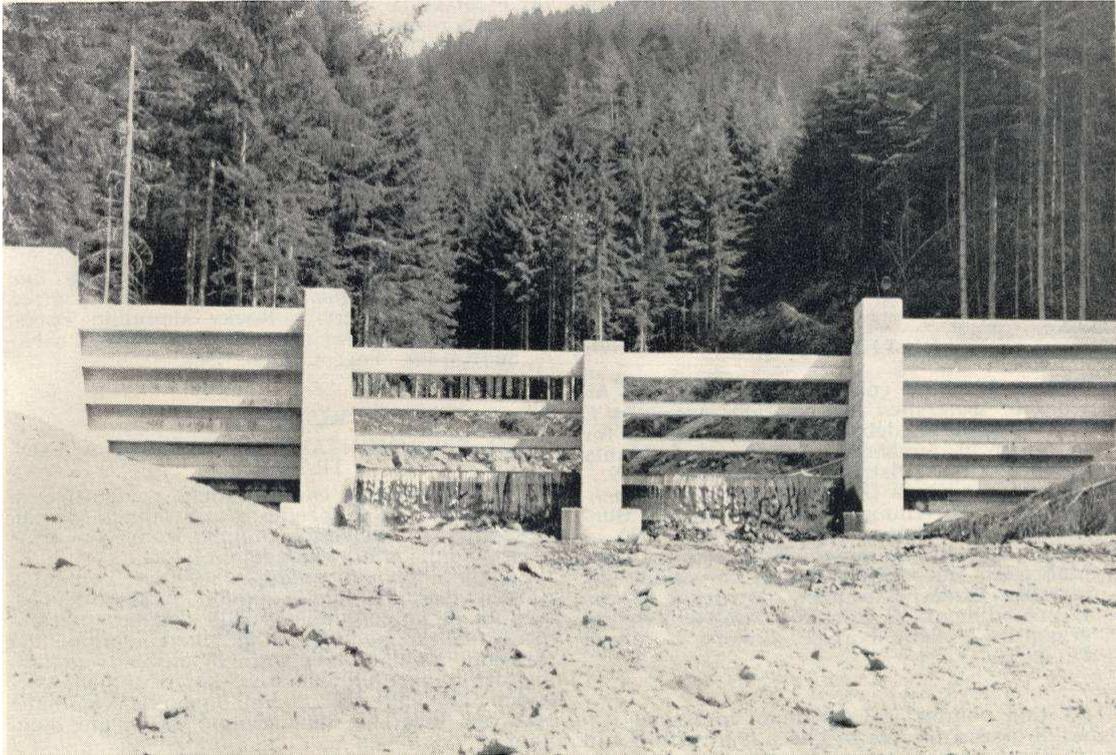


Figura 4.1 - Dique con contrafuertes (Fattorelli, 1972), visto desde aguas abajo después del montaje.

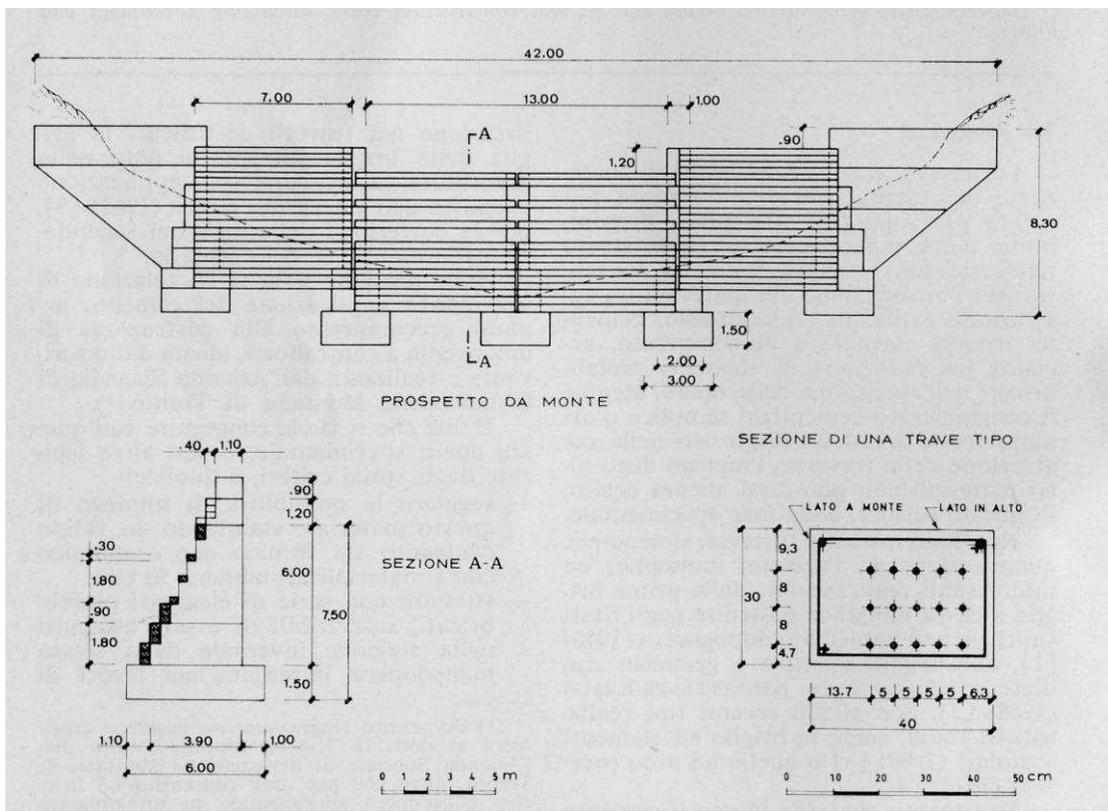


Figura 4.2 – Dique con contrafuertes parcialmente prefabricado con vigas en cemento armado precomprimido, proyectado por Fattorelli (1972).

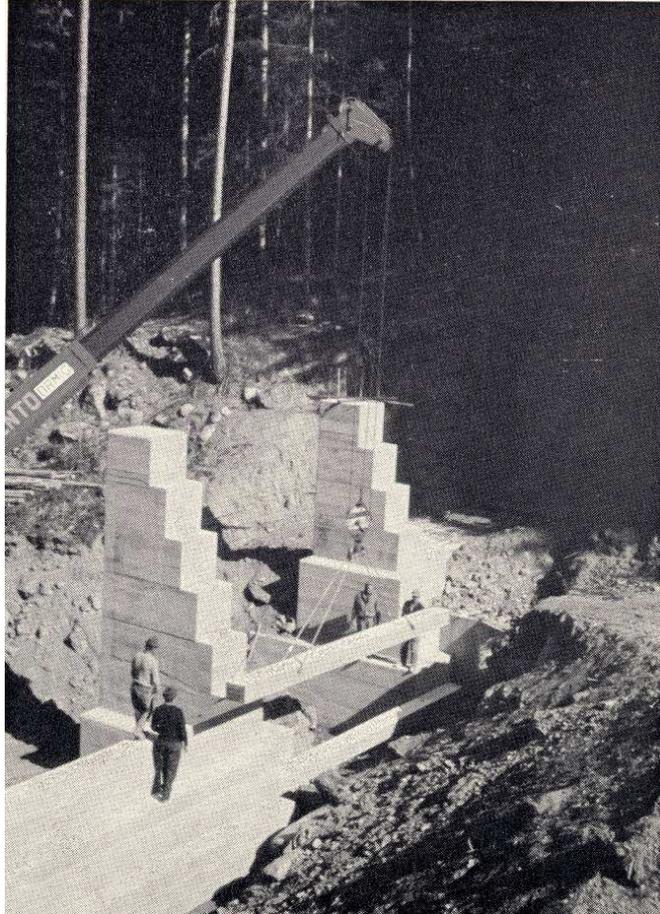


Figura 4.3 – Fase de montaje de un elemento prefabricado del dique prefabricado proyectado por Fattorelli (1972), en el tramo final del Río Gasolin; Ziano, Trento, Italia.

La experiencia acumulada en la realización del prototipo anteriormente descrito, ha llevado a aportar ulteriores consideraciones y mejoras las cuales han perfeccionado las ventajas inherentes este tipo de obras consistentes fundamentalmente en el tipo de estructura elegido y en la modalidad constructiva empleada.

Otras realizaciones similares pueden ser ilustradas como ejemplo en Italia de la construcción de diques filtrantes de este tipo, incluso en ambientes climáticos diferentes de los del Norte (Triveneto), de las cuales merecen una especial consideración las realizaciones efectuadas por Puglisi (1968-1976) en el Sur de Italia, en la Región Basilicata.

La Fig. 4.4 muestra el dique parcialmente prefabricado situado en el Vallone del Inferno, afluente del Río Basento. En la fotografía se evidencia el carácter filtrante de la obra y la ausencia de erosión localizada aguas abajo de la estructura.

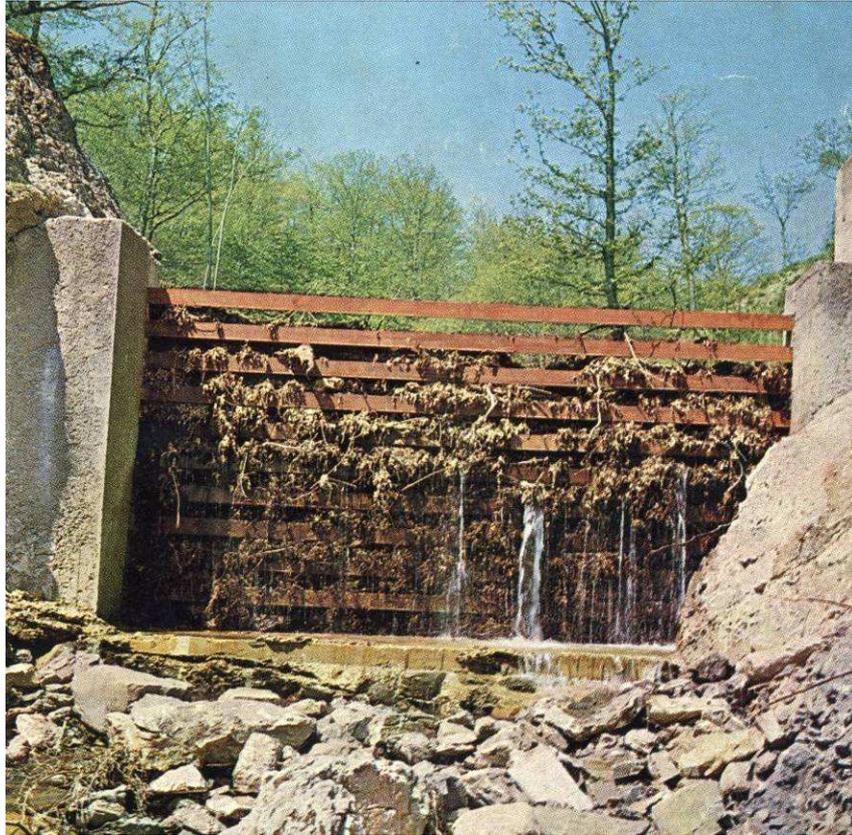


Figura 4.4 – Dique parcialmente prefabricado proyectado por Puglisi (1968), en el Vallone del Inferno, tributario del Río Basento; Anzi (Potenza); Región Basilicata, Italia.

4.3 EXPERIENCIA AUSTRIACA -ITALIANA: DIQUES CON CONTRAFUERTES Y FILTRO

El mayor impulso en la realización y en el perfeccionamiento de los diques de tipo abierto debe ser atribuido, siempre a partir de los años 70, a las experimentaciones en el campo conducidas en Austria, en particular en las regiones del Tirol, del Voralberg y del Salisburghese (Fiebiger, 1986; Kettl, 1989; Kronfellner-Kraus, 1970; Kronfellner-Kraus, 1972; Leys, 1971; Ublagger, 1972; Zedlacher y *Otros*, 1979). Las dos funciones del dique abierto a las cuales la escuela austriaca aportó las mayores innovaciones constructivas están relacionadas con el control de las coladas detríticas y con el control de LWD y del material flotante en general. Esta última función es un problema común a casi todas las obras de tipo abierto, pues el atarquinamiento del filtro por efecto de LWD puede causar la anulación de la función selectiva reduciéndola a una obra de consolidación o bien de simple retención del sedimento.

En relación a la función de control de las coladas detríticas la escuela austriaca propuso una tipología interesante de obra que prevé la combinación de cuneos rompe-coladas y diques a fisuras (Ferro y *Otros*, 2004). Algunas obras inspiradas a este principio han sido realizadas recientemente en Italia: por ejemplo un dique realizado en un afluente del torrente Avisio en Val de Fasa (Río Dona, Trento), proyectada para reducir el riesgo en el cono de deyección situado aguas abajo (Fig. 4.5), y una obra rompe-colada realizada en el torrente Chiepena en la Valle del Brenta (Fig. 4.6 y Fig. 4.7).



Figura 4.5 – Ejemplo de obra filtrante con un cuneo rompe-colada, visto desde aguas arriba y desde aguas abajo (Fuente: Provincia Autónoma de Trento, 1991).



Figura 4.6 - Torrente Chiepena; dique filtrante construido en la parte alta de la cuenca en el 1992 (Fuente: Cerato, 1999).



Figura 4.7 - Dique filtrante con función de detención de la colada detrítica (Torrente Chieppena, Trento), (Fuente: Ferro y Otros, 2004) .

En la función de control del material flotante transportado por la corriente, la experiencia Austriaca, sucesivamente confirmada de aplicaciones realizadas también en Italia (Cerato, 1996), ha determinado como más funcional la adopción de rejas caracterizadas de elementos inclinados diversamente respecto a la horizontal y dispuestos en modo de favorecer, durante la riada, el levantamiento del material flotante y su alejamiento de las aberturas.

Típica de estas obras es la sucesión creciente hacia lo alto de los ángulos que los diferentes tramos de reja asumen respecto a la horizontal (Fig. 4.8; Torrente Duron, Italia): se puede partir de una inclinación de 60° y en algunos casos el filtro puede terminar con un ulterior tramo horizontal puesto a la cota de coronamiento. Es decir; se trata de filtros con más de una inclinación.

En la Fig. 4.9 se muestra una solución constructiva típica que prevé la adopción de contrafuertes aguas arriba de la obra; estos pueden así asumir la doble función de apoyo para los elementos constituyentes el filtro y de aumento de la rigidez y de refuerzo estático para el armazón en cemento armado. El filtro está constituido por perfiles de acero con elementos dispuestos según una doble inclinación (Fig. 4.9).

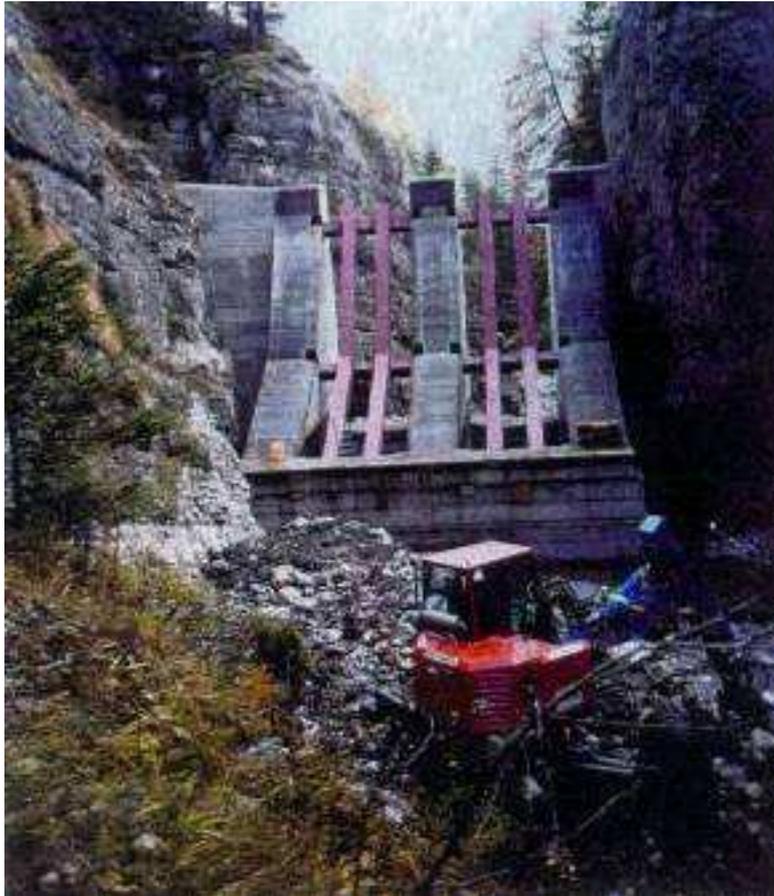


Figura 4.8 - Fase de construcción de un dique filtrante con contrafuertes y filtro en perfiles de acero y elementos dispuestos con doble inclinación visto desde aguas arriba (Río Duron, Italia).



Figura 4.9 - Dique filtrante en Val Duron antes y después de una crecida (Fuente: Ferro y Otros, 2004).

La presencia de detritos leñosos flotantes es un problema que influencia en modo notable la capacidad de funcionamiento de todas las obras filtrantes y en particular de las obras con rejas o con elementos reticulares horizontales, verticales y/o combinados. La inclinación de la reja, conjuntamente con el estrechamiento de la sección del flujo que se produce en el cuerpo del dique, causa el levantamiento del material leñoso y permite el pasaje del caudal líquido sin alterar, de este modo, la capacidad de selección granulométrica de la estructura. Para limitar la influencia del material leñoso flotante sobre la capacidad de selección de la estructura ha sido ideada una reja con elementos longitudinales (barras), pero con ángulo de inclinación variable (Fig. 4.10). El primer sector en la base, funciona como una obra de toma con rejas horizontales, el cual se conecta con una reja con inclinación creciente constituida por un primer tramo con pendiente 1:3, al cual sigue uno inclinado de 45°. El tramo de reja que se nivela con el vertedero del dique principal es de nuevo horizontal. Los troncos y detritos leñosos de pequeñas dimensiones pueden atravesar la reja mientras que los más gruesos, que son retenidos por la reja, son movimentados y alejados y por ello no ponen obstáculos al pasaje del caudal sólido. Ejemplificando otras evoluciones del mismo criterio de construcción, en las Fig. 4.11 y 4.12 se muestran dos diques selectivos a triple inclinación.

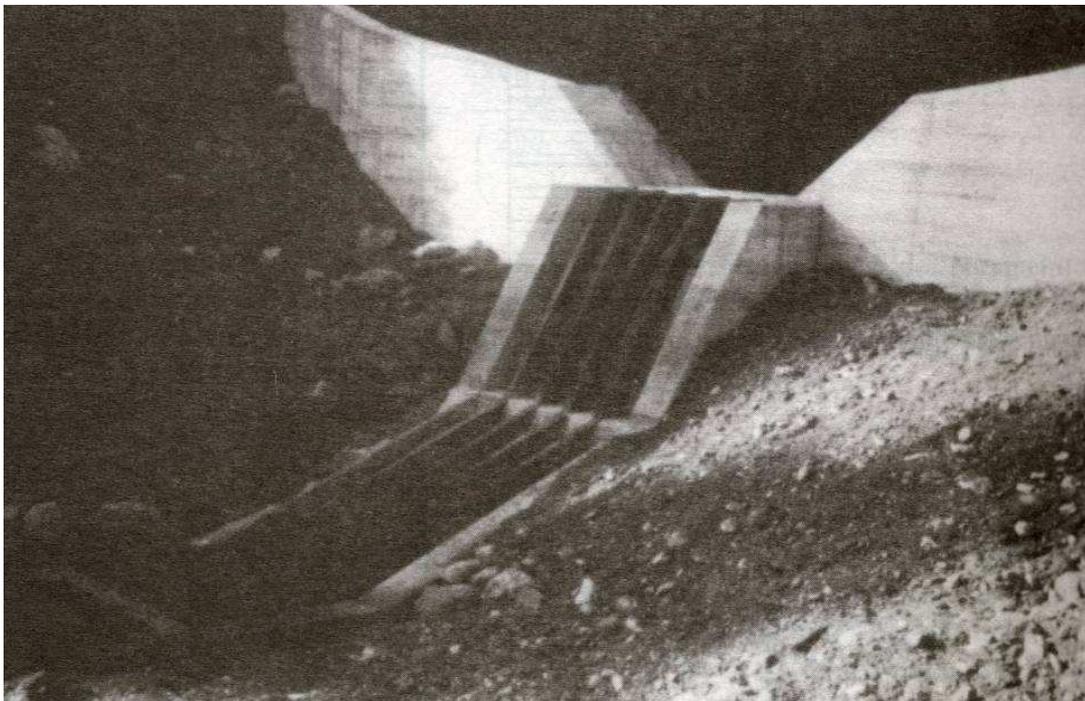


Figura 4.10 - Particular de una reja a pendiente variable en un dique abierto realizado en el canal Ahornkar/Wagrain, Austria.



Figura 4.11 - Dique abierto selectivo a triple inclinación.



Figura 4.12 - Dique selectivo a triple inclinación (Torrente Fumola, Trento) (Fuente: Degetto, 2000).

La Fig. 4.13 muestra un dique filtrante selectivo clásico realizado según el sistema Genet (1953), con reja inclinada; la forma y ubicación del vertedero evita la concentración de la vena y reduce sensiblemente el peligro de excavación aguas abajo. El proyectista ha estimado para este tipo de obra una economía de cerca el 50 %, respecto a una obra normal a paramento lleno. Es a partir de esta tipología de dique selectivo abierto, que estos autores se han inspirado sucesivamente para proponer diques con rejillas y contrafuerte. En las Fig. 4.14 y 4.15 se ejemplifican diques selectivos abiertos selectivos con rejillas inclinadas dispuestas verticalmente.



Figura 4.13 – Dique filtrante tipo “Genet” dispuesto en el cierre de la plaza de depósito en el Río Taviela, Valle del Noce, Trento, Italia (Fuente: Provincia Autónoma de Trento, 1991).

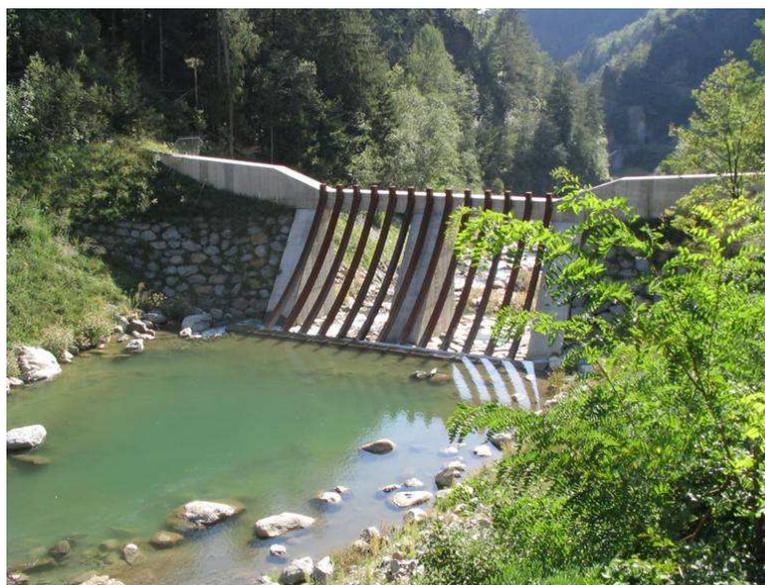


Figura 4.14 – Dique selectivo con reja y filtro inclinado (Torrente Isarco, Alto Adige).



Figura 4.15 – Dique selectivo con filtro inclinado y plaza de deposito aguas arriba (Trento).

4.4 MODELOS EXPERIMENTALES SOBRE LA EFICIENCIA DE RETENCIÓN DE TRONCOS EN LOS FILTROS

La eficiencia de retención que ejerce un filtro sobre los troncos flotantes en la corriente es de difícil cuantificación; aquella asume, sin embargo, una importancia fundamental cuando el pasaje aguas abajo de los troncos puede llegar a comprometer seriamente la funcionalidad hidráulica de las secciones transversales más críticas y de la infraestructura allí existente.

Una experimentación sobre modelo físico ha sido realizada por D'Agostino y *Otros*, (1999) en el laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Universidad de Trento. En las experimentaciones se evaluó el comportamiento de los troncos en correspondencia de un dique abierto, en donde el filtro ha sido reproducido empleando una reja inclinada, en forma de analizar diferentes espacios (anchuras) entre los elementos. Test experimentales han sido conducidos en un pequeño canal de longitud 9 m (Fig. 4.16) constituido por tres zonas con pendientes diferentes.

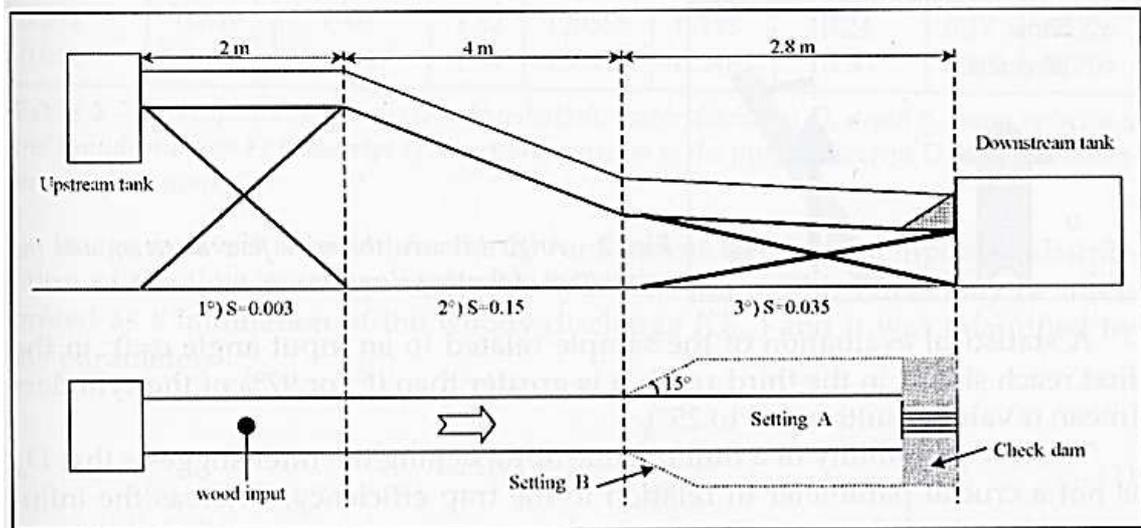


Figura 4.16 - Canal de laboratorio de longitud de 9 metros, utilizado por D'Agostino y Otros (1999) en las experimentaciones sobre la eficiencia de captura de troncos, en diques selectivos con filtro.

La primera zona ha sido utilizada para la introducción de los troncos ($s=0.3\%$; longitud=2 m; anchura=0.25 m). La segunda zona ha sido utilizada para el transporte ($s=15\%$; longitud=4 m; anchura=0.25 m), en correspondencia de esta zona la madera pueden ser transportada velozmente hacia aguas abajo. El ultimo tramo ($s=3.5\%$; longitud=208 m) reproduce la zona aguas arriba del dique abierto en el cual la madera es retenida y contempla dos configuraciones: una anchura constante e igual a 0.25 (configuración A, Fig. 4.16) y otra que se ensancha de 0.25 m a 0.5 m y a continuación de la cual ha sido realizada una zona a anchura constante e igual a 0.5 m (configuración B, Fig. 4.16). La configuración A ha sido utilizada para el estudio del comportamiento hidrodinámico de los troncos en las zonas de detención; ambas zonas A y B, en vez, han sido utilizadas para evaluar la eficiencia del filtro en términos de captura de los troncos y mantenimiento de la función hidráulica. El experimento ha sido conducido con granulometrías representativas diferentes ($D_{medium}=0.017$ m; $D_{50}=0.016$ m, $D_{84}=0.019$ m), y para simular la madera (troncos) han sido utilizados cilindros con las siguientes características: peso específico $\gamma = 8240 \text{ N m}^{-3}$, diámetro $D_w = 0.006$ m, longitud $L_w = 0.08$ m para algunos experimentos y 0.16 m para los otros. Los movimientos de la madera (troncos cilíndricos) han sido evaluados mediante el soporte de imágenes y registrados con video cámara. Las imágenes han sido analizadas mediante software especializado.

En el modelo los autores han asegurado un cambio de régimen hidráulico, a través de una brusca variación de la pendiente del fondo, del 15 % al 3.5 % (Fig. 4.17). Las primeras pruebas de laboratorio han permitido observar que el resalto hidráulico, localizado en el ingreso de la plaza de sedimentación, ejerce un sensible efecto distributivo sobre los troncos que entran, funcionando como un embalse virtual, el cual aumenta el tiempo de traslado y propagación de los troncos. Si se introduce en la parte inicial del canal un determinado volumen de troncos y se indica con $t_{log D}$ el tiempo que este tronco emplea para transitar desde la sección D de la Fig. 4.17 y con $t_{log U}$ el mismo tiempo relativo de tránsito por la sección U de la Fig. 4.13, es posible definir el siguiente parámetro de laminación, LAM .

$$LAM = 1 - (t_{log D} / t_{log U}) \quad (4.1)$$

En forma equivalente LAM podría ser expresado introduciendo en la ecuación anterior la relación entre el caudal de troncos que salen y que entran en la cuenca o plaza de sedimentación, en vez de utilizar los respectivos tiempos de tránsito. Las experiencias de laboratorio han permitido obtener, para un caudal de troncos prefijado (n. de troncos por segundo) introducidos aguas arriba, una relación de proporcionalidad lineal entre el parámetro de laminación y la diferencia ΔF entre los números de Froude de la corriente entre las secciones U y D ($F_U - F_D$), respectivamente aguas arriba y abajo del resalto hidráulico. Creciendo esta diferencia aumenta la capacidad del resalto de atrapar temporáneamente los troncos y de laminar parcialmente el caudal de los mismos. Este resultado es muy importante, pues una eficaz re-distribución de los troncos que se disponen en modo congestionado al ingreso en la plaza de sedimentación, significa la posibilidad de evitar una completa obstrucción del filtro.

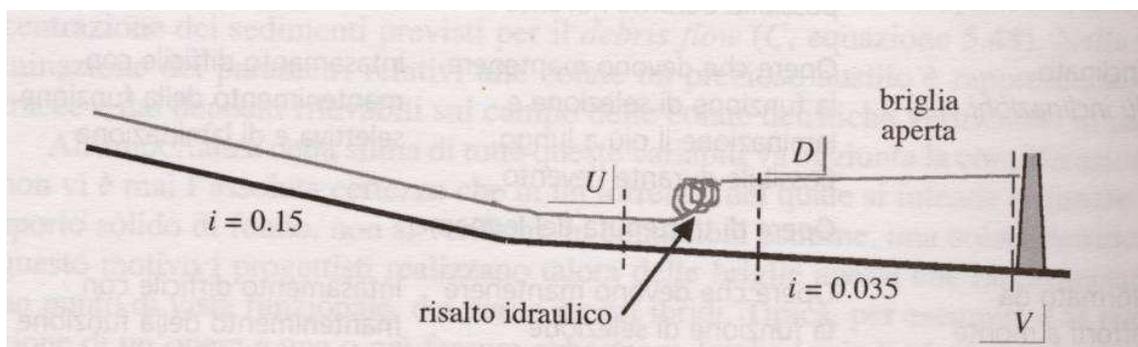


Figura 4.17 - Esquema del dispositivo experimental utilizado por D'Agostino y Otros (2000), para el estudio del comportamiento del material flotante (Fuente: Ferro y Otros, 2004).

En los experimentos citados ha sido también estimada la capacidad del filtro de retener los troncos en función de su grado de abertura ϖ y de su inclinación α respecto a la horizontal.

La eficiencia del filtro ha sido testada en relación a la madera retenida (troncos cilíndricos) y a la capacidad de mantenimiento del caudal descargado aguas abajo del dique, después de la captura de los troncos. La eficiencia de captura, T , ha sido expresada mediante una relación entre el número de troncos interceptados por el filtro y el número de elementos que en conjunto fueron introducidos aguas arriba del filtro. T , ha sido analizada en función de la variación sistemática de los siguientes parámetros:

- El espacio horizontal entre los elementos del dique (ϖ); si b representa la anchura entre dos barras adyacentes y s el espesor de cada uno de los n elementos:

$$\varpi = \frac{b - ns}{n + 1} \quad (4.2)$$

con los valores de n testados igual a 1,2,...,10;

- El ángulo α formado aguas abajo del filtro entre los elementos del dique y el plano horizontal ha sido evaluado para valores iguales a: $\alpha = 90^\circ, 60^\circ, 45^\circ, 30^\circ$ y 20° ;
- La relación (IR) entre el caudal de entrada de los troncos (Q_{log}) y el caudal líquido (Q);
- La configuración de las disposiciones A y B de la tercera parte del pequeño canal;
- Longitud de los troncos L_w igual a 0.08 y 0.16 m.

De la combinación de los parámetros aquí descritos, D'Agostino y Otros (1999) han efectuado 840 experimentos de los cuales han propuesto las siguientes conclusiones:

- Velocidad de los troncos y velocidad de la corriente en superficie: valores semejantes; implica que el número de Froude es igual para troncos y para el caudal líquido;
- Ángulo entre el cilindro (tronco) y el flujo principal, D_w : la evaluación estadística indica que en el primer tramo α es mayor de 0° para el 97 % de los cilindros y el valor medio del ángulo es 25° . La baja probabilidad que α sea nulo en proximidad al filtro sugiere que D_w no sea un parámetro crucial en relación a la eficiencia de captura, mientras es dominante la influencia de la longitud, L_w ;

- El pasaje del flujo de supercrítico a subcrítico ejerce un rol importante en la redistribución de la madera introducida. En particular el efecto de laminación es directamente proporcional a la diferencia de los números de Froude aguas arriba y abajo del resalto.

En el estudio de la eficiencia de captura en la retención, *T, D'Agostino y Otros (1999)* recogen algunas consideraciones hechas por Ishikawa, el cual había ligado la eficiencia a la captura a través de un parámetro adimensional:

$$\sigma = \frac{h\varpi^2}{D_{\log} L_{\log}} \quad (4.3)$$

en donde h es el tirante aguas arriba del dique. No obstante *D'Agostino y Otros (1999)*, subrayan la mayor importancia de otro grupo adimensional:

$$\xi = \frac{\varpi}{L_{\log}} \frac{gh}{u_v^2} = \frac{\varpi}{L_{\log} Fr_v^2} \quad (4.4)$$

en donde u_v y Fr_v son, respectivamente, la velocidad media del flujo y el número de Froude en la sección considerada. Al disminuir ξ , aumenta la posibilidad de los troncos de ser retenidos por el filtro. El hecho que en la expresión de ξ no aparezca el diámetro del tronco, siendo este más pequeño de la abertura considerada, w , lleva a los autores a concluir que no es el diámetro del tronco aquella dimensión que influencia mayormente la eficiencia de captura.

No obstante, las fuertes simplificaciones impuestas en la realización del modelo de laboratorio, en particular en la representación de los CWD, *D'Agostino y Otros (1999)*, proponen algunos criterios que pueden ser utilizados en la fase de diseño y proyecto, y que pueden ser extraídos del análisis efectuado:

- La creación de un resalto hidráulico a la entrada de la cuenca de retención ocasiona una acción de “descongestión” de la carga de troncos. Este efecto es muy útil sobretodo cuando una gran cantidad de sedimentos coexiste con los CWD, o bien cuando es alta la probabilidad que el filtro sea obstruido.
- La eficiencia de captura de la madera resulta positivamente correlacionada a la inclinación del filtro, al parámetro dimensional dependiente del espacio entre los

elementos del filtro, a la longitud del tronco y al número de Froude en la parte de flujo inmediatamente aguas arriba del filtro.

- La consideración precedente puede ser utilizada en el dimensionamiento y proyecto del filtro en relación con la eficiencia de captura o, al contrario, con la eficiencia del pasaje-tránsito hacia aguas abajo. Este último aspecto, puede ser tenido en consideración en el caso de dos diques abiertos sucesivos proyectados específicamente para dos funciones diferentes: al primero situado aguas arriba se le puede asignar una función prevalente de control del caudal madera-troncos, mientras que el segundo puede controlar mejor el transporte de los sedimentos dejando pasar a través de él el residuo de la madera.
- La alta eficiencia de captura del filtro utilizado puede inducir a una alta posibilidad de obstrucción del filtro durante un evento de avenida. Con la finalidad de aumentar el periodo de funcionamiento hidráulico del filtro, los autores (D'Agostino y *Otros*, 1999), han sugerido ángulos de inclinación de 20°-30°, y en general menores de 45°.

Estos resultados obtenidos deben ser aplicados con cautela fuera del campo de valores calibrados con el modelo, y en particular, en el caso de troncos caracterizados por la presencia de abundante cantidad de ramas.

4.5 DIQUES-REDES PARA LA RETENCIÓN DE LA MADERA

Entre las posibilidades consideradas para la retención de la madera, aquella de la red ha sido estudiada en detalle por Rimbock (2004) el cual ha conseguido individuar los elementos claves, o más bien precisos sobre el diseño y proyecto de tales obras que resultan sobretodo más práctica gracias al simple material de construcción utilizado.

La estructura principal que soporta las fuerzas, consiste en redes dispuestas perpendicularmente a la dirección del flujo del torrente. En general las redes tienen dimensiones del diámetro comprendidas entre los 18 y los 28 mm. Las redes están dispuestas a una distancia de cerca 0.50-1.0 metros del fondo del cauce, de modo tal que la avenida ordinaria privada de madera y de sedimentos transportados puedan pasar sin interferencia alguna por debajo de la misma.

Rimbock (2004) estudiando un modelo físico, ha podido observar como la madera tiende a acumularse sobre estas redes y como influye sobre el caudal sólido y líquido. Únicos troncos singulares o piezas de madera pueden pasar la red sin que se forme una acumulación (*log jam*). Un tronco ramificado, en vez, es un potencial elemento de captura que origina la formación de *log jam*. La madera, que a continuación se detiene en correspondencia de la red representa un ulterior elemento de captura de sedimentos y elementos de otra naturaleza.

Los principales parámetros que influyen los esfuerzos sobre la red son (en orden de importancia):

- Composición de la madera: más alta es la tasa de partículas pequeñas y finas, más denso es el *log jam* y más alta es la acumulación de agua en correspondencia a los esfuerzos ejercidos sobre la red;
- Caudal: la fuerza crece linealmente con el caudal;
- Gradiente y cantidad de madera.

4.5.1 ELEMENTOS PARA EL DISEÑO Y PROYECTO DE LA RED

El modelo físico experimental efectuado para simular el proceso ha permitido determinar los parámetros que más influyen el fenómeno y los esfuerzos que actúan sobre la red, estableciendo las indicaciones para el diseño y proyecto de este tipo de obras. Rimböck (2004), propone por lo tanto una solución que resulta válida para los detritos leñosos y transporte sólido normal (no aplicable, en vez, a coladas detríticas) y que ha sido evaluada sobre la base de un modelo experimental efectuado durante un proyecto de búsqueda de un prototipo en escala real. Un esquema que describe el procedimiento utilizado en el diseño y proyecto de la red para la retención de la madera es ilustrado en la siguiente Tab. 4.2. Los principales parámetros para el diseño y proyecto que Rimbock propone en el esquema son la altura de la red (que está basada sobre la pendiente del torrente considerado), la cantidad de madera, el caudal líquido, la rugosidad del torrente, la proporción de material fino y la pendiente de las márgenes. Las dimensiones de las redes y las fuerzas de anclaje resultan ser función de esta altura y de la presión hidrostática del agua. Algunos de los elementos tomados en consideración en el diseño y proyecto se ilustran en la Fig. 4.18.

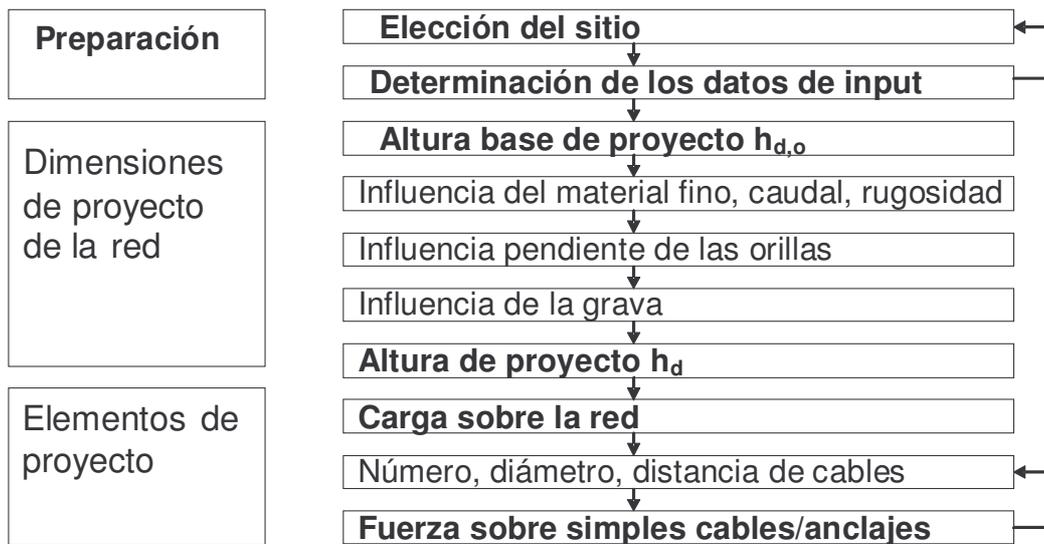


Tabla 4.2 - Esquema para el diseño y proyecto de la red para la retención de la madera (Rimböck, 2004).

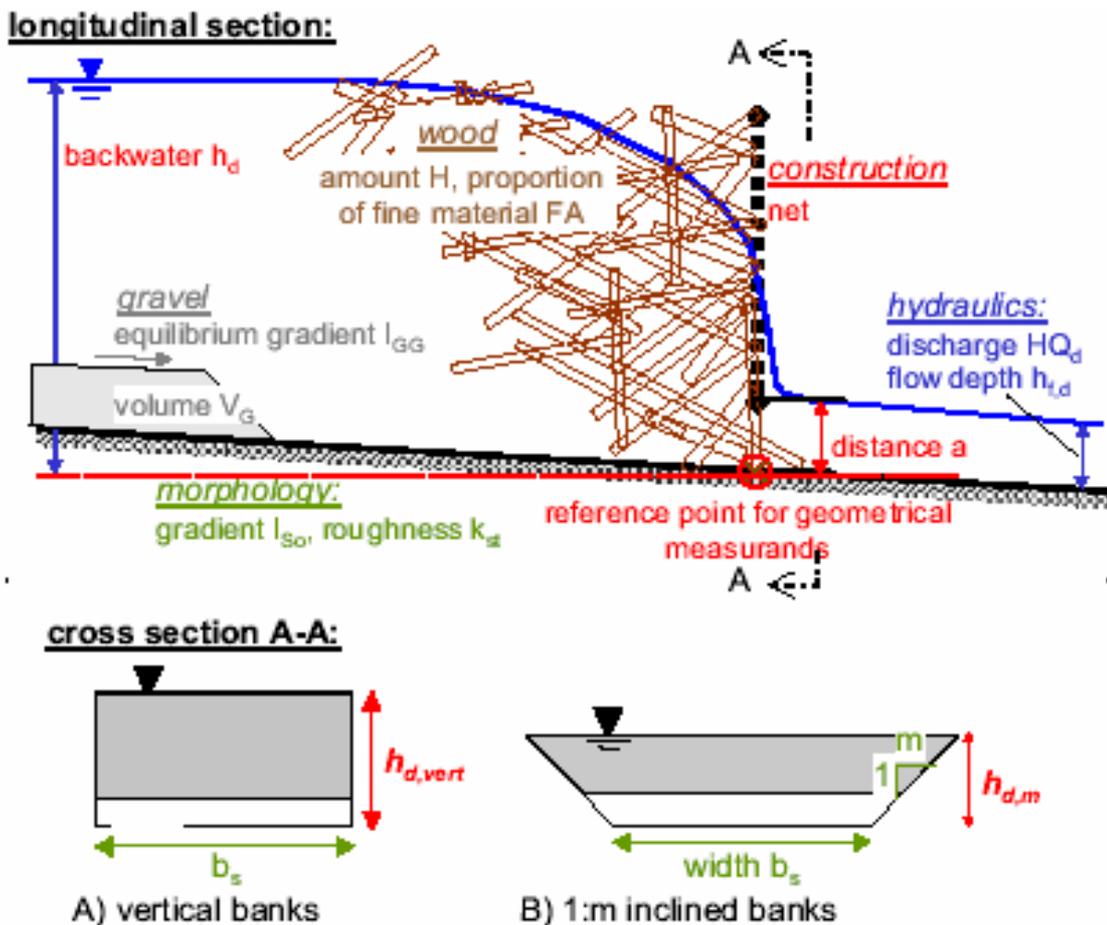


Figura 4.18 - Perfil longitudinal y secciones transversales en la disposición de la red (Rimböck, 2004).

4.5.2 ELECCIÓN DE LA LOCALIZACIÓN

Para la elección de la localización de la obra, Rimbock (2004) sugiere evaluar las siguientes condiciones:

- Elegir un tramo rectilíneo del torrente con baja pendiente (grandes espacios para retener la madera, menor fuerza sobre la red, mejor separación entre troncos y detritos sólidos);
- Orillas altas, rocosas y poco inclinadas facilitan el anclaje lateral de la red, y favorecen una mayor altura de la curva de remanso;
- Sitio fácilmente accesible (para inspección y limpieza) cerca del lugar a proteger.

Los límites considerados por Rimbock (2004) para una razonable y adecuada realización de estas estructuras son expuestos en la Tabla 4.3. En otros casos puede ser elegida una nueva posición de la red u otro tipo de estructuras, como “*rakes*” (umbral de fondo con dientes verticales o dique filtrante con peine a forma de “V”); o bien diques con fisuras y rejillas. La Fig. 4.19 muestra un esquema de las estructuras más adecuadas para la retención de troncos y detritos leñosos, en función de los dos parámetros más importantes que pueden ser considerados: caudal líquido y cantidad de detritos.

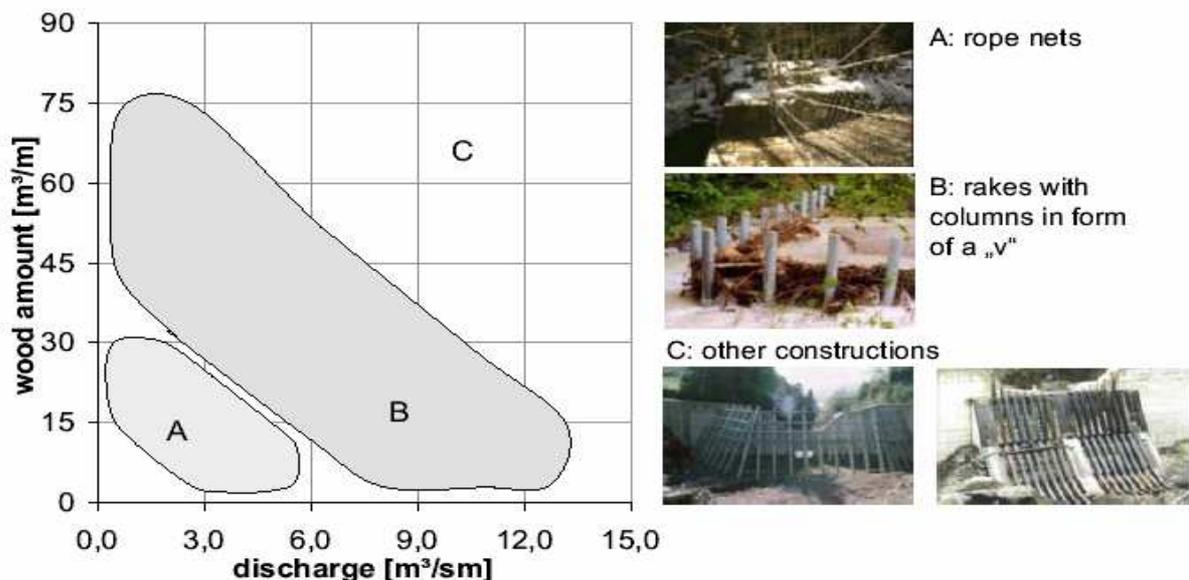


Figura 4.19 – Campo de utilización de estructuras para la retención de troncos y detritos leñosos (Rimböck, 2004).

En la Tabla 4.4 son expuestos los valores de input que según Rimbock (2004) son necesarios evaluar para el diseño y proyecto de una estructura dique-red. Ella incluye también sugerencias sobre como recoger datos. Los datos coleccionados pueden variar mucho a causa del tipo de material considerado y de la cantidad de madera y de material fino; en consecuencia, son necesarios diferentes métodos de cálculo los cuales deberán ser evaluados caso por caso.

| Anchura sección b_s | Radio de curvatura r | Caudal q | Pendiente I_{s0} | Cantidad de madera H | Volumen de material sólido grueso V_G |
|--------------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------------|--|
| ≤ 15 m | > 10 ancho | $\leq 5,0$ m ³ /sm | ≤ 5 % | ≤ 20 m ³ /m | ≤ 100 m ³ /m |

Tabla 4.3 - Condiciones para la realización de estructuras con redes (Fuente: Rimböck, 2004).

| | Cantidad | Símbolo | Unidad | Posible método |
|---|--------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|---|
| Morfología en correspondencia de la red | Pendiente | I_{s0} | % | Medición de campo, mapas topográficos |
| | Anchura sección | b_s | m | Medición de campo |
| | Inclinación orillas | $I:m$ | - | Medición de campo |
| | Rugosidad | k_{sr} | m ^{1/3} s ⁻¹ | Cálculo, estima |
| Material sólido grueso (Bed load) | Pendiente de equilibrio del torrente | I_{GG} | % | Estima con mediciones de campo; cálculo fórmula de Meyer-Peter y Muller (1948), para torrentes en equilibrio |
| | Volumen específico | V_G | m ³ m ⁻¹ | Estima con mediciones de campo; cálculo formula de Smart-Jaggi (1983); cálculo formula di Meyer-Peter Muller (1948) |
| Hidráulica | Caudal (específico) | q_{10} q_d | m ³ sm ⁻¹ | Medidas de caudal, curva Wundt, HQ10 \approx 0.5 * HQ100 |
| | Tirante | $h_{f,10}$ $h_{f,d}$ | m | Medición del tirante hídrico, fórmula de Strickler |
| Detritos leñosos | Cantidad | H | m ³ m ⁻¹ | Medición de campo, estima basada en fotos aéreas (Rimbock, 2004); estima visiva. |
| | Material fino | FA | % | Medición campo, estima visiva |

Tabla 4.4 - Datos de input para el diseño y proyecto (Fuente: Rimbock, 2004).

4.5.3 DIMENSIONES DE LA RED

En el diseño y proyecto de la red, Rimbock (2004) calcula inicialmente la altura del remanso, $V_{d,0}$, necesaria para la sucesiva definición de la altura de proyecto, $h_{d,vert}$. La altura del remanso mínima que es necesario tener en consideración depende del volumen de detritos de madera acumulado H , y de la pendiente, I_{s0} , y se obtiene aplicando la siguiente expresión:

$$h_{d,0} = 3,22 \cdot H^c \quad (4.5)$$

con c igual a 0,20 para $I_{s0} = 1,0 \%$; 0,25 para $I_{s0} = 3,0 \%$, y 0,26 para $I_{s0} = 5,0 \%$. Estos valores son validos para una rugosidad igual a $k_{sr,base} = 35 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$; caudal $q_{base} = 3,0 \text{ m}^3 \text{ sm}^{-1}$; proporción de material fino $FA = 15 \%$ y orillas verticales. En torrentes caracterizados por una elevada rugosidad, la curva de remanso permanece más baja, por efecto de la diferencia de rugosidad en el fondo y en las orillas. Si la rugosidad, ksr , es diferente del valor de base, $k_{sr,base} = 35 \text{ m}^{(1/3)}/\text{s}$, precedentemente considerado, es posible calcular un factor que liga los dos aspectos según la siguiente ecuación:

$$f_r = 1 - \left(\frac{1}{3} \cdot \frac{k_{sr,base} - ksr}{k_{sr,base}} \right) = 1 - \left(\frac{1}{3} \cdot \frac{35 - ksr}{35} \right) \quad (4.6)$$

Si el caudal específico q_d , aumenta, también la curva de remanso aumentará aguas arriba de la red. Este aumento puede ser considerado mediante la introducción de un factor f_q :

$$f_q = \sqrt{\frac{q_d}{q_{base}}} = \sqrt{\frac{q_d}{3,0 \text{ m}^3 / \text{sm}}} \quad (4.7)$$

Si las demás condiciones de borde no cambian, el *log jam* tiende a acumular material más fino, creando una masa más densa y causando el aumento del nivel de aguas arriba del *log jam*. En este fenómeno asume una gran importancia la acumulación de ramas, hojas y raíces, la cual puede ser expresada a través de un factor f_{FA} , igual a:

$$f_{FA} = 1,38 \cdot FA^{0,17} \quad (4.8)$$

La altura del proyecto resulta ser igual a:

$$h_{d,vert} = f_r \cdot f_q \cdot f_{FA} \cdot h_{d,0} \quad (4.9)$$

Otro elemento que puede reducir la altura de la curva de remanso es la inclinación de las márgenes. Cuando el nivel hidrométrico se incrementa, el espacio lateral en anchura resulta

mayor; por lo tanto, también la madera y los detritos tenderán a distribuirse lateralmente y se concentrará menos en correspondencia de la red. Rimbock (2004), dada una inclinación de las márgenes igual a 1 m, establece que la altura del remanso se reducirá hasta alcanzar un valor igual a $h_{d,m}$ (Fig. 4.18, sección A-A) y estará relacionado con la altura de proyecto mediante un factor f_{bank} , igual a:

$$f_{bank} = \frac{h_{d,m}}{h_{d,vert}} \quad (4.10)$$

Esta ecuación es válida para un ancho de la sección b_s , comprendido entre $0,5\text{m} < b_s < 15$ m y para una relación $h_{d,vert}/h_f > 3$, en la cual, h_f , es la altura que se crea aguas abajo de la red. Otro parámetro de proyecto importante resulta la distancia mínima entre el borde inferior de la red y el lecho del río, a . Este valor debe ser determinado con cuidado y debe estar relacionado ya sea con el grado de seguridad necesario aguas abajo de la barrera, como así también con las condiciones del movimiento en correspondencia de la obra. Si este espacio es demasiado pequeño el proceso de retención de detritos inicia muy pronto, principalmente con material fino, y se arriesga que la red pueda ser obstruida demasiado velozmente (en poco tiempo). Si el espacio, en vez, es demasiado grande (en altura), troncos grandes pueden pasar por debajo de la red causando la formación de *log jam* aguas abajo de la red. Una buena elección para este parámetro puede ser la profundidad del flujo en correspondencia del cual tiene lugar el inicio de un transporte generalizado de la madera y sobretodo de los grandes troncos. Una buena estimación puede ser el tirante en correspondencia de un tiempo de retorno variable entre 5 y 20 años. Si esto no puede ser determinado, Rimbock (2004) aconseja un valor comprendido entre 0.5 y 1 metro.

4.5.4 EFECTOS DE CAPTURA DE SEDIMENTOS

El estudio del comportamiento del material leñoso y de los detritos sólidos en correspondencia de la obra es importante al fin de establecer el empuje total sobre la red. A la fuerza hidrostática es necesario agregar una fuerza adicional la cual puede ser esquematizada en forma diferente considerando que se acumulará solo material leñoso, solo detritos sólidos o ambos. Después que se produce la retención de la madera se forma una pequeña cuenca de sedimentación aguas arriba de la red, en la cual se decanta el material detrítico compuesto por los elementos más gruesos (gravas y guijarros). Normalmente la madera alcanza la red dentro de un breve tiempo durante los eventos de avenida, mientras que el transporte y la

sedimentación de material detrítico ocurren en tiempos más largos (Fig. 4.20). Rimbock (2004), esquematiza dos situaciones límite en relación al volumen acumulado por los detritos (gravas y guijarros), V_G , el cual, puede ejercer una influencia significativa sobre el *log jam*. Si el volumen de sedimentos, V_G , alcanza el valor $V_{G,1}$, este comienza a influenciar la acumulación del material leñoso (Fig. 4.20). Si $V_{G,1} < V_G < V_{G,2}$, la acumulación de madera resulta más densa causando un remanso más elevado y una mayor acumulación de agua y, en consecuencia, esfuerzos mayores. Si el volumen de sedimentos supera el valor $V_{G,2}$, la cantidad de sedimentos gruesos son predominantes y los *large woody debris* tienen una importancia secundaria en relación a la evaluación de las cargas actuantes y del proyecto en general. Los volúmenes límite considerados son calculados por las siguientes fórmulas:

$$V_{G,1} = \frac{1}{2} \frac{(h_{G,1})^2}{I_{S0} - I_{GG}} \quad (4.11)$$

$$V_{G,2} = \frac{1}{2} \frac{(h_{d,m} - h_{G,G})^2}{I_{S0} - I_{GG}} \quad (4.12)$$

Con

$$h_{G,1} = h_{d,m} - I_{S,0} \cdot 5 \cdot h_{d,m} - h_{GG} \quad (4.13)$$

Para los valores de $h_{d,m}$, I_{S0} , I_{GG} , $h_{G,1}$ y $h_{G,G}$ se hace referencia a las Fig. 4.18 y 4.20.

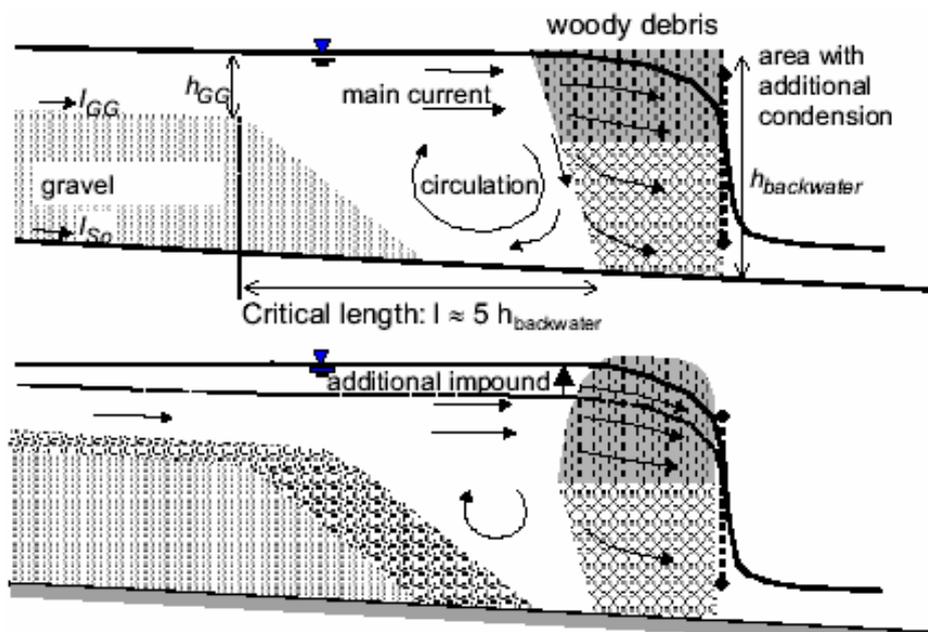


Figura 4.20 - Efectos de la captura de sedimentos (Fuente: Rimbock, 2004).

4.5.5 DIMENSIONAMIENTO

El dimensionamiento de cada uno de los cables se realiza a través de un procedimiento interactivo: después de la elección del diámetro de cada cable y de las distancias entre ellos, se calculan las cargas (esfuerzos) en cada uno de los cables. Si el cálculo no resulta correcto, las dimensiones se re-adaptan hasta alcanzar una situación idónea de carga.

Las cargas (esfuerzos) totales sobre la red (calculadas en base a la altura de proyecto V_d) se distribuyen entre cada una de los cables según el esquema de la distribución de presiones hidrostáticas (Fig. 4.21). Para cada cable la altura que influencia la carga se establece como la suma de la mitad de la distancia entre el cable considerado y los dos más vecinos. Para el cable más bajo y para el cable más alto, en cambio, se hace referencia a la distancia con el fondo del cauce y con el pelo libre, respectivamente.

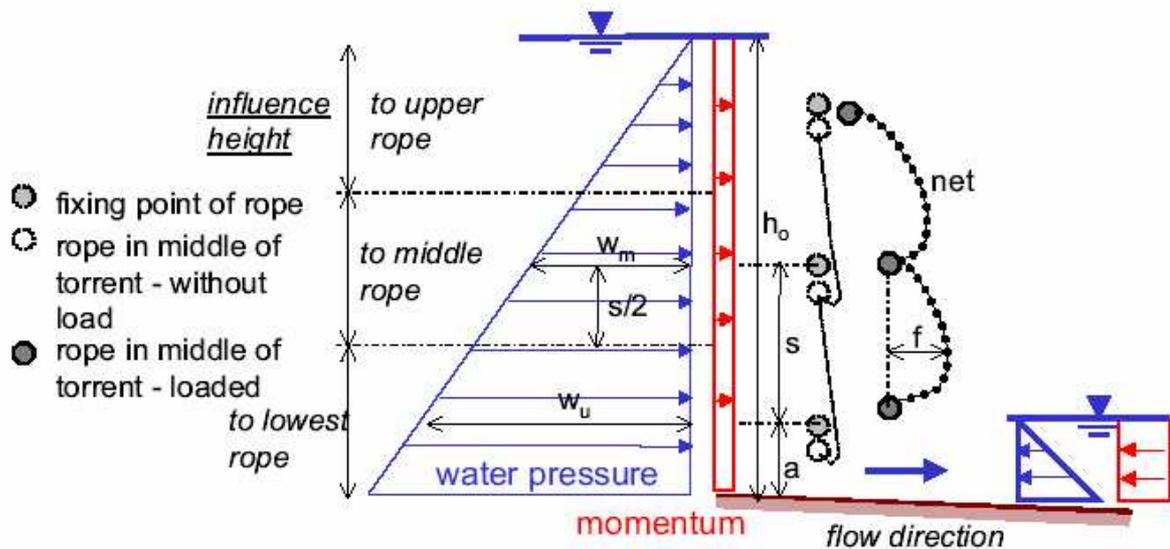


Figura 4.21 - Distribución de las cargas en cada cable (Fuente: Rimbock, 2004).

En el cálculo de la componente de la carga horizontal H_x , Rimbock (2004) utiliza la iteración de Newton, que permite resolver la ecuación universal de los cables (Palkowski, 1990), Figura 4.22. En la evaluación de la distribución de las cargas verticales, la red puede ser considerada como un único cable. Una atención particular, no obstante, debe ser dirigida al cable situado más bajo, es decir en proximidad del fondo del cauce, el cual resulta decisivo en la construcción de toda la red en su conjunto, puesto que está sujeto a los mayores esfuerzos.

Por razones de seguridad se prefiere reducir la distancia entre este cable y el cable sucesivo (no más de 0.5 metros).

Las fuerzas dinámicas pueden ser despreciadas dado que la carga estática considerada es más que suficiente desde el punto de vista proyectual. El único elemento necesario de cálculo es la fuerza del impacto en correspondencia del último cable en caso de elevada velocidad del torrente ($> 3,0 \text{ m s}^{-1}$) y en caso de transporte de troncos muy gruesos ($L_{log} > 7,5 \text{ m}$).

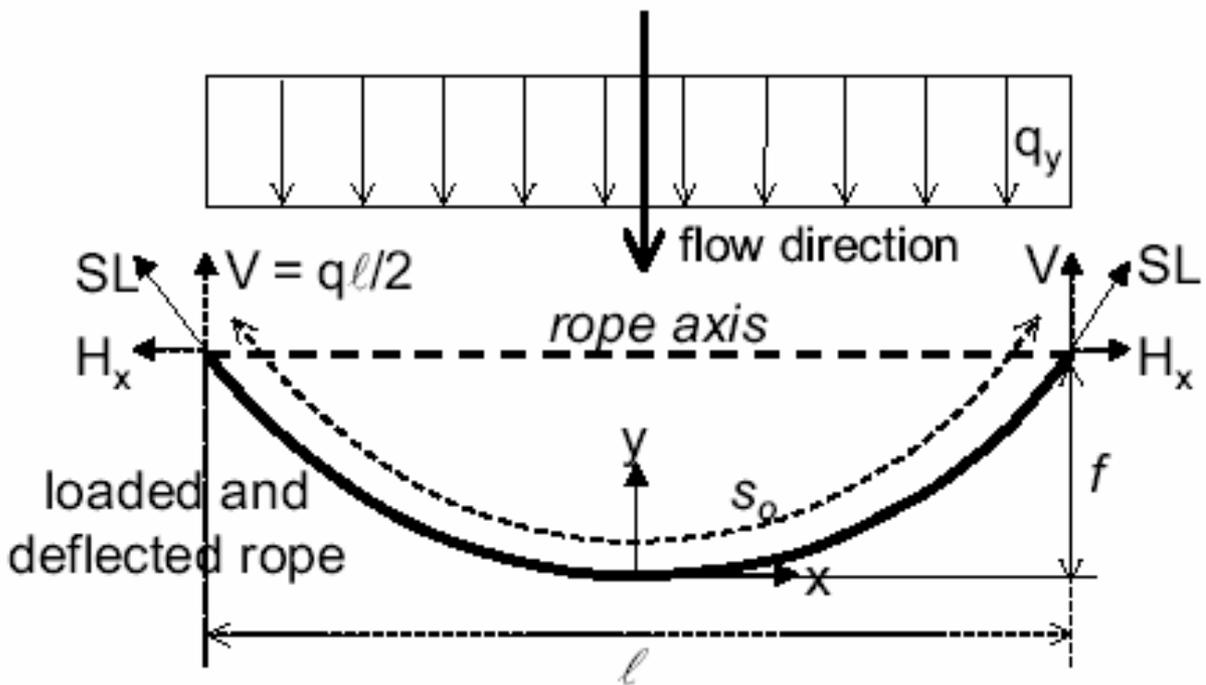


Figura 4.22 - Distribución de la carga horizontal en cada cable (Fuente: Rimbock, 2004).

4.5.6 SUGERENCIAS CONSTRUCTIVAS

Rimbock (2004), con el fin de facilitar la construcción de la red, propone una serie de indicaciones. Cuerdas circulares son preferibles en razón de la buena distribución de las cargas y de su elasticidad. Éstas deberían ser instaladas con tiempo suficiente para permitir una buena deformación y reducir los esfuerzos verticales. Como para la definición de la distancia del límite inferior de la red desde el lecho del río, también la malla de la red va elegida sobre la base del nivel de seguridad que se quiere asegurar aguas abajo. Puede ser también elegida una red con mallas más estrechas en las partes inferiores y más anchas en la parte superior para así

facilitar la captura de los troncos más grandes y largos y del material sólido grueso y troncos largos en las últimas fases del proceso.

Es importante proteger el torrente de la erosión en proximidad de la red, en la zona aguas arriba y en seguida aguas abajo de la red, como es importante también considerar la disipación de la energía total en fase de proyecto. Las sugerencias de Rimbock (2004) se orientan hacia una protección a través del revestimiento con platea, mientras que en Italia (ver Capítulo 4.3), la solución de construir un umbral de fondo aguas abajo de la estructura, ha asegurado esa protección contra la erosión del fondo.

Los diques de red son muy usados también para la retención de material transportado por coladas detríticas. La Fig. 4.23 muestra un dique de red (ancho 20 m y alto 4 m) construido en el Rio Aobandani (Japon), que ha retenido mas de 700 m³ de material inerte (GEOBRUGG, 2006).



Figura 4.23 – Dique de red después de una colada detrítica (Fuente: GEOBRUGG, 2006).

4.6 DIQUES CABLEADOS (CABLE DAM)

La literatura técnica ofrece una tipología más bien limitada de diques cableados y normalmente se trata de obras cuya estructura de retención está hecha de un trenzado de cables dispuestos según mallas de diferente anchura. Obras de este tipo han sido construidas principalmente en Francia y en Rusia.

Convencido partidario del empleo de *cable dam* ha sido, en el territorio francés, Monnet, quien ha dejado sobre el argumento una interesante bibliografía (Monnet, 1960). *Cable dam* en grado de absorber el impacto dinámico provocado por lavas torrenciales han sido realizadas en Georgia (Gagoshidze, 1969) según el esquema estructural de la Fig.4.24. Son obras admisibles en caso de una anchura del cauce limitado, pero resultan de difícil manutención, especialmente en ocasión de importantes eventos de avenida, porque no facilitan la recuperación del material retenido y/o el vaciado de la plazoleta de depósito situada aguas arriba del dique.

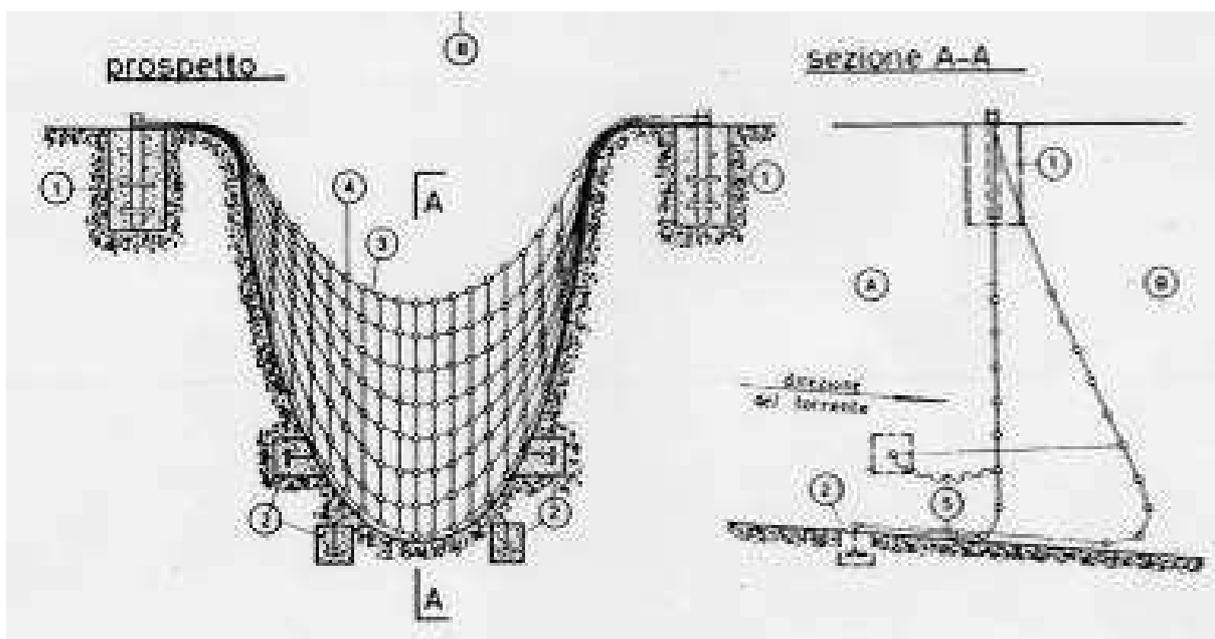


Figura 4.24 - Esquema estructural de una red-dique selectivo (Fuente: Gagoshidze, 1969).

4.6.1 DIQUE CABLEADO SOBRE EL RÍO SARCA (TRENTO, ITALIA)

Un dique abierto de la tipología de cables es aquel proyectado por Fattorelli y Mazzalai (1982) en el Río Sarca a la altura del pueblo de Bocenago, Trento (Fig. 4.25, 4.26, 4.27). Este

dique ha sido localizado en el cierre de una amplia plaza de depósito (la superficie de la plaza es de casi 20 ha) con el fin de optimizar su capacidad de llenado.



Figura 4.25 - Dique abierto cableado en el río Sarca (Bocenago-Italia).



Figura 4.26 - Contrafuerte central del dique cableado en el T. Sarca (Bocenago-Italia).



Figura 4.27 - Dique cableado y umbral de fondo visto desde aguas abajo, T. Sarca (Bocenago-Italia).

La obra ha sido construida sobre una sección del cauce de anchura de más de 70 m y asume una conformación planimétrica a forma de V con el vértice dirigido hacia aguas arriba. La estructura de retención ha sido realizada con cables horizontales (distanciados según la altura desde el fondo) que se anclan a dos plateas posicionadas en proximidad a las orillas y a un único gran contrafuerte central (el vértice de la V) ubicado en el eje del cauce. La disposición del filtro hace que la reacción en los puntos de anclaje resulte contenida y que el material que flota en la corriente sea orientado hacia las orillas, favoreciendo las operaciones sucesivas de vaciado y manutención; es decir, las operaciones de recolección, extracción, y transporte del material (LWD) con maquinaria adecuada, las cuales pueden operar en ambas márgenes. Las tres obras de anclaje de los cables, que en términos generales puedan ser realizados con tecnología de cimentación diversa, están constituidas por grandes plateas modeladas y enterradas, cuyas dimensiones planimétricas externas son de 10 x 9 m para el anclaje central, y de 13 x 7 m para los anclajes laterales, dada también la presencia aguas abajo de un dique (umbral de fondo) que impide el socavamiento como consecuencia de una

eventual erosión de fondo del cauce. El dimensionamiento estático ha sido realizado considerando el paramento aguas arriba a pared llena y fuerza hidrodinámica sobre una parte de la cota de la altura total; se ha obtenido así sobre la total anchura de la obra una carga R igual a 1000 t.

Tratándose de un sistema a cables, donde no puede ser transcurable la deformación debida al incremento de las cargas, se ha utilizado una distribución de las solicitaciones sobre los aparatos de anclaje no equilibrados, pero congruente a la posible deformación. En particular la repartición ha sido de $1/3 R$ en los anclajes laterales y $1/2 R$ sobre el central. Semejante repartición resulta también de la aplicación de la ecuación clásica del cable con carga repartida a lo largo de su proyección; en esta hipótesis se ha verificado la condición de estabilidad global (vuelco, arrastramiento y presión máxima sobre el terreno) de las porciones simples de la estructura.

Particular cuidado ha sido puesto en el dimensionamiento de la estructura de regulación y de amarre de los cables. Los cables son de acero galvanizado con diámetro de 40 mm, tipo AZN PYTHON y ánima metálica y envolvimiento cruzado derecho; cada uno de ellos presenta una carga de rotura mínima de 128 t. El sistema de anclaje es con regulación mecánica de la tensión mediante barra con rosca; el valor de la pretensión ha sido fijado igual o cerca $1/4$ de la tensión máxima admisible.

El empleo de este tipo de obra ofrece una solución de ordenación muy elegante, consintiendo el cierre de un plaza de depósito sobre una sección más bien ancha (la capacidad de embalse estimada para la plaza es de cerca medio millón de metros cúbicos) y en correspondencia a la cual una solución de tipo más tradicional habría producido un impacto más bien elevado sobre el curso del agua, sin alcanzar una funcionalidad semejante.

El uso de esta obra para la retención de material vegetal y de LWD ha sido muy eficaz, cosa que ha llevado a la ideación de otro *cable dam* siempre sobre el Río Sarca, aguas arriba del puente de las Sarche (Fig. 4.28, 4.29, 4.30, 4.26, 4.31, 4.32), en localidad Tione (Trento). Su construcción, que ha sido recientemente terminada (Agosto de 2005), ha sido planificada en forma específica para la retención de LWD, al fin de evitar el transporte del mismo hasta el Lago de Garda. Esto permitirá evitar las operaciones de limpieza del Lago de Garda, las cuales resultan muy dificultosas y onerosas.

El aspecto específico de la obra, que se basa en la anterior y positiva experiencia de retención y funcionalidad verificada a través de la primera experiencia de construcción de dique cableado en Italia, consiste en la construcción de un túnel excavado en roca al costado de la estructura (Fig. 4.29 y 4.33) el cual, además de facilitar el acceso lateral a la estructura con maquinarias especializadas, permite un mantenimiento adecuado. Esa manutención consiste en la remoción y extracción del LWD mediante retro-excavadores, tractores y/o otra maquinaria con la potencia suficiente, gracias a la construcción de este pasaje lateral a la obra. En caso de crecidas de notable envergadura, a través de una abertura conectada al interno del túnel, con el fondo situado más arriba del nivel máximo de crecida previsto, es posible remover LWD, operando desde el interior del túnel mismo.

A diferencia del dique cableado situado aguas arriba del Río Sarca (Bocenago), la forma planimétrica de este nuevo dique es lineal, con los anclajes encastrados en las paredes verticales rocosas de las márgenes y un único contrafuerte central. Esta conformación planimétrica lineal determinada por la directriz anclajes-contrafuerte central, no resulta dispuesta ortogonal al eje del torrente sino conformando un ángulo de 60° al fin de orientar la trayectoria del material flotante hacia una de las dos orillas: aquélla en la cual ha sido construido el túnel-pasaje lateral.

Un aspecto considerado no menos secundario y que ha definitivamente impulsado la realización del proyecto de este tipo particular de obra de retención de LWD, es el bajo impacto ambiental que tiene ya sea desde el punto de vista visivo-paisajístico, técnico-construtivo, funcional operativo, como así también desde el punto de vista biológico-ecológico.

En las Figuras 4.29 y 4.33, es posible observar a la derecha en lo alto, la boca de abertura lateral conectada al túnel principal, desde donde será posible accionar las máquinas operadoras para la extracción del LWD, durante un evento de crecida. En esta misma foto se puede notar la dimensión general del contrafuerte central y la altura total cubierta por los cables dispuestos en forma paralela entre ellos.

En la Fig. 4.30, realizada durante la fase de construcción de la estructura, es posible notar aspectos particulares del contrafuerte central y de uno de los anclajes laterales situado sobre la margen izquierda del torrente, antes del tendido de los cables.



Figura 4.28 - Dique cableado en el Río Sarca, visto desde aguas abajo (Ponte delle Sarche-Italia).



Figura 4.29 - Dique cableado en el Río Sarca, visto desde aguas arriba (Ponte delle Sarche-Italia).



Figura 4.30 - Dique cableado durante la fase de construcción (Ponte delle Sarche-Italia).



Figura 4.31 - Contrafuerte central del dique cableado (Ponte delle Sarche-Italia).

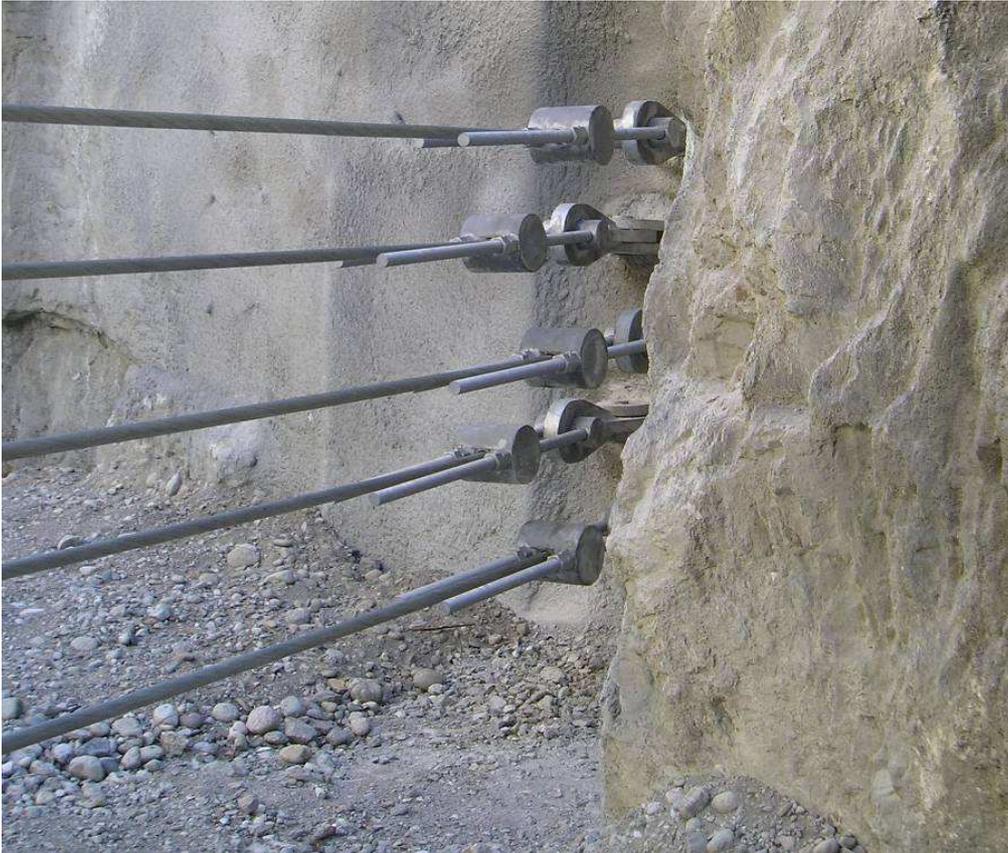


Figura 4.32 - Anclajes laterales de los cables en la pared rocosa (Ponte delle Sarche-Italia).



Figura 4.33 - Túnel lateral excavado en roca en la margen derecha para el mantenimiento de la estructura (Ponte delle Sarche-Italia).

4.7 EXPERIENCIA JAPONESA

El transporte de troncos es un argumento bastante estudiado en Japón, país caracterizado por una morfología prevalente de colinas y montañas, la mayor parte de las cuales están cubiertas de bosques. Esto en efecto, conlleva que en caso de derrumbe de las vertientes, deslizamientos y coladas detríticas, una gran masa de troncos-madera alcanza los ríos causando obstrucciones y daños evidentes a las infraestructuras. Múltiples han sido los eventos desastrosos causados por el transporte de troncos y de detritos y esto ha llevado a varios estudiosos japoneses a realizar experimentos para evaluar la eficiencia de las obras de retención del material vegetal flotante (Fig. 4.34). Los primeros estudios experimentales han sido enfocados en relación al movimiento de los troncos, a su inclinación respecto al flujo de la corriente, a su transporte y a su dependencia de los múltiples parámetros involucrados. Sasaki (1962), efectuó una serie de experimentos de laboratorio, ideó un modelo hidráulico para estudiar la eficiencia de captura por parte de redes y diques secundarios situados aguas arriba de diques para el control de la erosión de torrentes, con la finalidad de proteger estas obras de los troncos que podían alcanzar tales estructuras.



Figura 4.34 - Evento desastroso en el Japón (Shirakawa River, Takamori-cho, Kumamoto, mayo 1988; Fuente: Ishikawa, 1990).

Relativamente al movimiento o al depósito de troncos en las zonas de depósito de los diques o relativamente al estudio de la afluencia de troncos en presencia de diques de corrección de torrentes, Mizuhara (1975, 1976) determinó con modelos experimentales que la afluencia de los troncos está altamente influenciada por el peso específico y por la forma de los troncos. Siempre Mizuhara (1979), estudiando modelos hidráulicos sobre el movimiento de los troncos, ha visto, además, que la inclinación de los troncos respecto a la dirección del flujo

varia de 20 a 30 grados y no está correlacionado con el coeficiente de área cubierto por los troncos, al número de Froude, a la velocidad del flujo en superficie, pero si está en parte influenciada por el tipo de tronco (forma y peso específico). Mizuhara y *Otros* (1980) efectuaron experimentos de laboratorio para analizar las estructuras de retención del material y su real eficiencia de captura. De los estudios se evidenció que la capacidad de captura aumenta rápidamente cuando la densidad de los troncos crece más allá de un cierto límite y crece también con la disminución de la velocidad del flujo y con la disminución del tirante hídrico; esta capacidad aumenta también cuando aumenta la longitud de los troncos en relación a la abertura del dique utilizado. No obstante, Mizuhara non propone relaciones específicas al fin de establecer el nexo existente entre la eficiencia de captura y las características físicas de estas estructuras. Algunos análisis cuantitativos sobre la interacción entre los troncos y las estructuras de control han sido efectuados por Seno y *Otros* (1984).

4.7.1 EXPERIMENTACIÓN DE ISHIKAWA (1990)

En su publicación especializada, Ishikawa (1990) expone los resultados de experimentaciones y de aplicaciones efectuadas con modelos hidráulicos 2-D y 3-D, con la finalidad de poder proyectar estructuras con elevada eficiencia de captura de troncos transportados por crecidas, aluviones y coladas detríticas, con el objetivo de prevenir daños provocados por el impacto de estos fenómenos sobre esas estructuras. A tal fin investiga el impacto sobre las siguientes diferentes tipologías de estructuras: rejas y filtros en acero (*boom screens*), diques de corrección de torrentes clásicos (*erosion control dam*), diques abiertos o selectivos (*permeable erosion control dam*), como así también la combinación de las obras anteriormente mencionadas.

4.7.2 PRIMER TIPO DE ESPERIMENTO PARA LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE CAPTURA DE LAS OBRAS (1990)

Un primer tipo de experimento ha sido efectuado mediante un canal de laboratorio inclinado en cuya extremidad inferior ha sido aplicada una parte de canal plano sin pendiente el cual simula una zona de acumulación-sedimentación (Tab. 4.5). Las dimensiones de la estructura experimental, los aparatos y las diferentes configuraciones adoptadas se ilustran en las Figuras 4.35, 4.36, 4.37, 4.38 y 4.39.

| | Longitud (m) | Ancho (cm) | Profundidad (cm) | Pendiente (°) |
|-----------------------|--------------|------------|------------------|---------------|
| Canal inclinado | 5 | 20 | 40 | 17 |
| Zona de sedimentación | 2 | 20 | 40 | 0 |

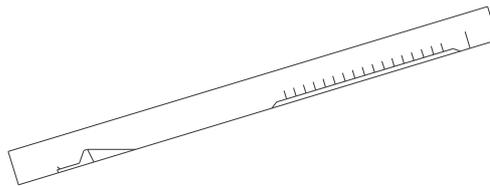
Tabla 4.5 – Dimensiones del canal de laboratorio (Fuente: Ishikawa, 1990).

Canal simple

Planimetría



Vista lateral



Canal con zona de sedimentación

Planimetría



Vista lateral

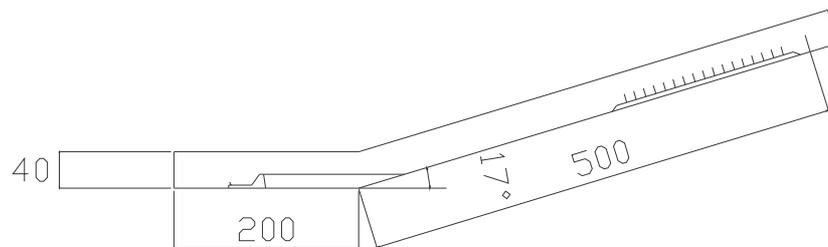


Figura 4.35 - Configuración del canal de laboratorio (Fuente: Ishikawa, 1990).

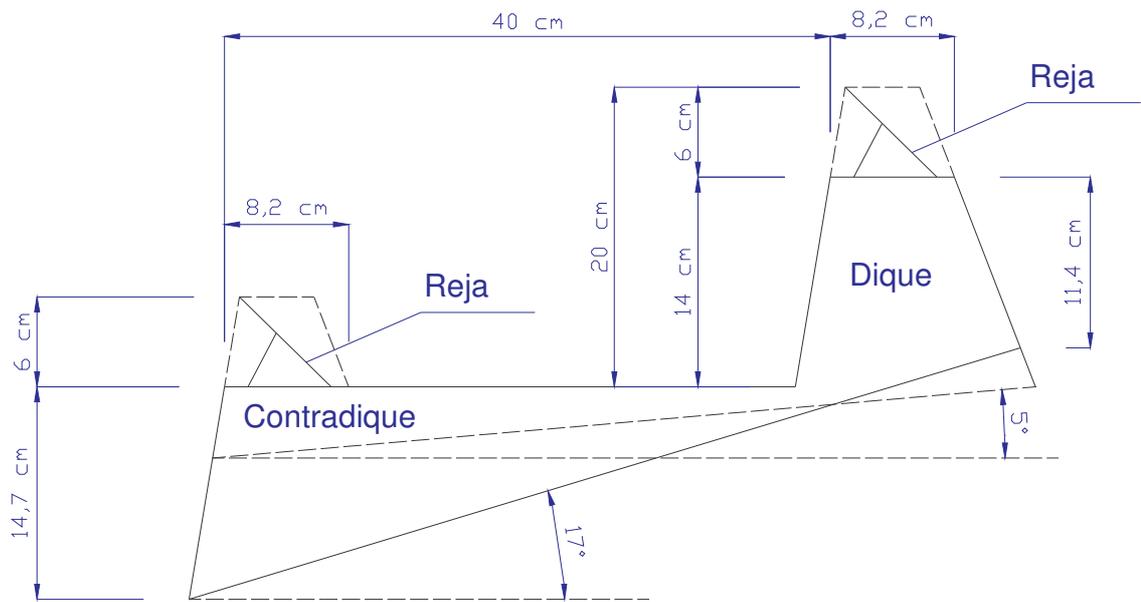


Figura 4.36 – Comportamiento del dique de corrección de torrentes clásico (Fuente: Ishikawa, 1990).

| | Tipología | | Tipología |
|---|-----------|---|-----------|
| 1 | | 5 | |
| 2 | | 6 | |
| 3 | | 7 | |
| 4 | | 8 | |

Figura 4.37 - Disposición del dique con contradique y posible aplicación de rejas (elementos reticulares) en acero (Fuente: Ishikawa, 1990).

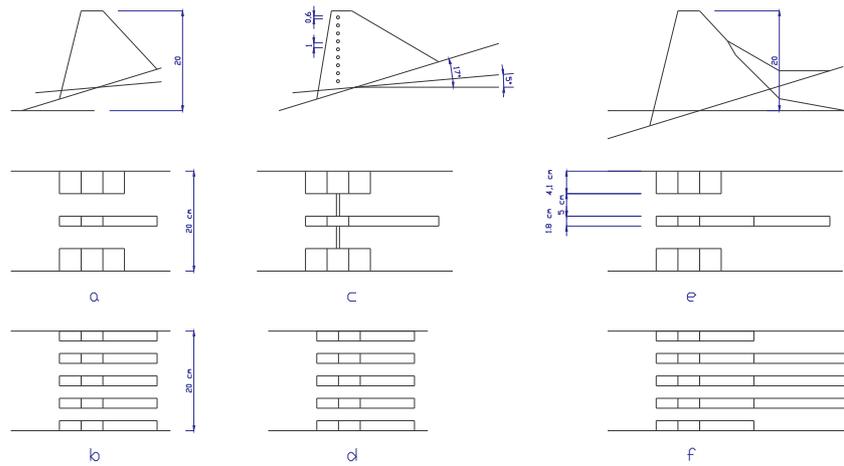


Figura 4.38 - Disposición de las aberturas del dique selectivo (Fuente: Ishikawa, 1990).

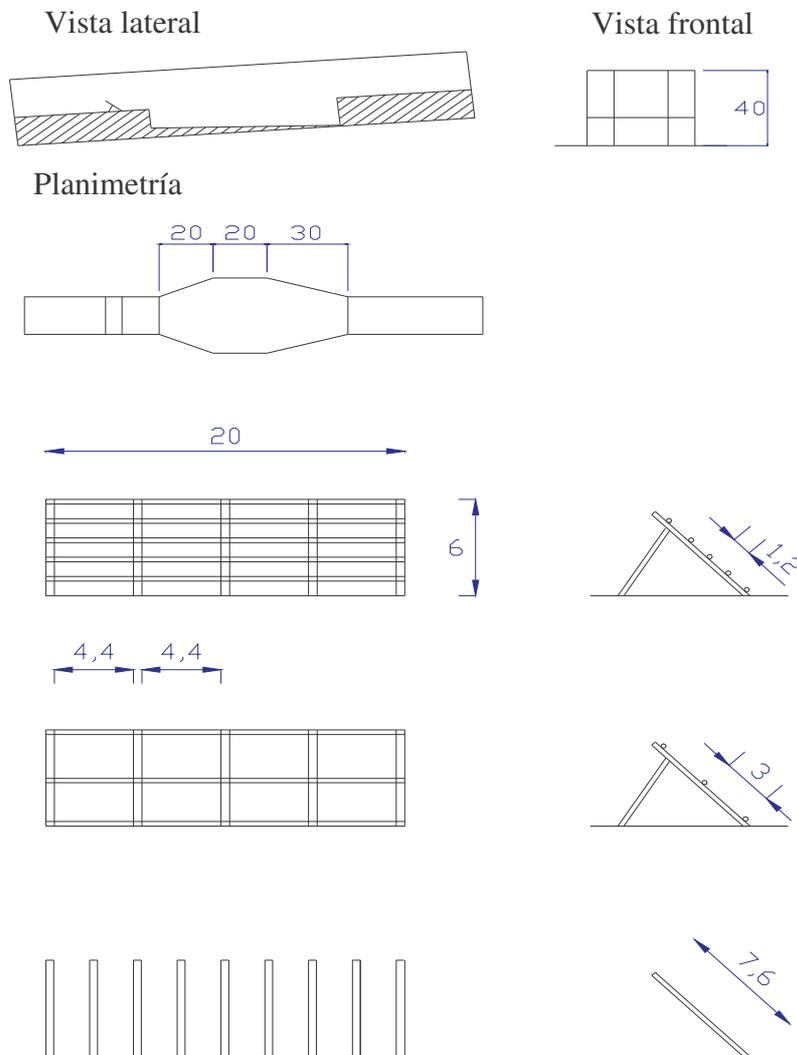


Figura 4.39 - Zona de depósito y tipologías de rejillas empleadas por Ishikawa (Fuente: Ishikawa, 1990).

La escala de las longitudes (horizontal y vertical) fue establecida en 1:50 y el modelo físico ha sido realizado considerando la similitud de Froude. Los diferentes caudales líquidos considerados fueron 1.0, 1.5 y 3 veces el caudal de proyecto Q_p , establecido en $11.7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; es decir, el caudal evaluado para el Río Sakai, en la zona montana de Rokko, caracterizada por una cuenca de alimentación de 0.2 km^2 . No fueron considerados concentraciones del sedimento en suspensión en la inmisión del caudal líquido.

El fondo del canal fue pavimentado con un espesor de arena y gravas caracterizadas por un diámetro máximo de 25.4 mm y por un diámetro medio de 3.4 mm. Los troncos fueron simulados mediante cilindros de madera con peso específico variable entre 9100 y 9800 N/m^3 y con forma variable según las indicaciones establecidas en la Tab. 4.6, y fueron posicionadas sobre el fondo a igual distancia entre ellos.

| Tipología | Longitud (cm) | Diámetro (cm) |
|-----------|---------------|---------------|
| 1 | 10 | 0.3 |
| 2 | 10 | 0.8 |
| 3 | 5 | 0.3 |
| 4 | 5 | 0.8 |

Tabla 4.6 - Tipología de troncos utilizados por Ishikawa (Fuente: Ishikawa 1990).

En la zona de acumulación-sedimentación, con la finalidad de evaluar la eficiencia de captura del detrito leñoso, fueron cambiadas las condiciones alternando la presencia y la ausencia de tipologías diferentes de diques colocados a 1 m aguas abajo de la extremidad inferior del canal inclinado. En base a las posibles combinaciones de simulaciones fueron individualizadas tres tipologías prevalentes de experimentos:

- *Dique de corrección de torrentes clásico*: Fue evaluado su comportamiento en diferentes condiciones según el esquema de la Fig. 4.36, presencia o ausencia del contradique, utilización de una o más rejas o elementos reticulares en acero agregados a la estructura según tres disposiciones diferentes (A, B, C) (Fig. 4.37);
- *Dique abierto o selectivo*: Fue evaluada la eficiencia de la disposición de diferentes formas de aberturas, y para alguna la presencia de vigas cruzadas en acero (Fig. 4.38);
- *Zona de acumulación-sedimentación*: En ausencia de dique y con presencia de rejas (retículos) en acero según las tipologías ilustradas en la Fig. 4.39, con la finalidad de evaluar un eventual y ulterior transporte de troncos aguas abajo.

Las experimentaciones consistieron en 428 pruebas de laboratorio, variando las siguientes condiciones: caudal líquido, la tipología de dique y de reja utilizada y las formas de los troncos, según lo indicado en la Tab 4.7.

Las pruebas fueron filmadas con videocámara ya sea desde lo alto como lateralmente y, en casos necesarios, fueron también medidos los niveles hidrométricos en los cuales el agua superó ya sea el dique o bien el contradique.

Caso dique clásico con reja

| Pendiente | Tipo de estructura | Q ($l\ s^{-1}$) | Arena fina | D_{log} (cm) | L_{log} (cm) | N° troncos | N° test |
|-----------|----------------------------|------------------------|---------------|-------------------|-------------------|---------------|---------|
| 17 | 1. Con rejas | 0.66 | 10 | 3 | 5 | 100 | 320 |
| 5 | 2. Dique principal tipo A* | 1 | 20 | 8 | 10 | 200 | |
| | 3. Dique principal tipo B* | | | | | | |
| | 4. Contradique tipo A* | 2 | | | | | |
| | 5. Contradique tipo B* | 30 | | | | | |

*A y B se refieren a la figura 4.32.

Caso dique abierto-selectivo

| Pendiente | Tipología dique | Presencia de vigas cruzadas | Q ($l\ s^{-1}$) | Arena fina | Diámetro troncos (cm) | Longitud troncos (cm) | N° troncos | N° puebas |
|-----------|--------------------|-----------------------------------|------------------------|---------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------|--------------|
| 17 | a | Si | 2 | 30 | 0.3 | 5 | 100 | 96 |
| 5 | b | No | | | | | | |
| | c | | | | | | | |
| | d | | 0.8 | 10 | | | | |
| | e | | | | | | | |

Caso zona de sedimentación

| Pendiente | Tipología dique | Q ($l\ s^{-1}$) | Arena fina | Diámetro troncos (cm) | Longitud troncos (cm) | N° troncos | N° pruebas |
|-----------|--------------------|------------------------|---------------|-----------------------------|--------------------------|---------------|------------|
| 5 | Si | 2 | 30 | 0.3 | 5 | 100 | 12 |
| | Tipo A | | | 0.8 | | | |
| | Tipo B | | | 10 | | | |

Tabla 4.7 - Descripción de las características de las pruebas de laboratorio (Fuente: Ishikawa, 1990).

4.7.3 EFICIENCIA DE RETENCIÓN DE LOS TRONCOS

Distinguiendo entre los experimentos apenas descritos Ishikawa (1990) individuó un parámetro T , el cual sintetiza la eficiencia de captura de cada una de las tipologías de estructuras consideradas.

4.7.3.1 Eficiencia de retención de las rejas (boom screens)

Ishikawa (1990) individualizó la capacidad de retención T de una reja calculándola como a continuación se detalla:

$$T = \frac{\text{número de troncos retenidos por la reja}}{\text{número de troncos dirigidos a la reja}} \quad (4.14)$$

El parámetro T evalúa cuales son los parámetros físicos que la influyen considerando el efecto de cada uno de ellos sobre T , tal como se indica en la Tab 4.8.

| Parámetros que ejercen influencia sobre T | Efecto sobre la eficiencia de captura T |
|--|--|
| Forma y tipo de tronco Caudal líquido Pendiente del canal | <ol style="list-style-type: none"> 1. T aumenta con la longitud del tronco L; 2. T aumenta con el diámetro del tronco D; 3. T aumenta con la disminución del caudal unitario q; 4. T aumenta con la disminución de la pendiente del canal. |
| Diámetro del tronco relativamente a la abertura horizontal y vertical de la reja | <ol style="list-style-type: none"> 1. No hay alguna aparente relación entre la abertura vertical de la reja y su capacidad de captura, o bien la abertura vertical de la reja no es influyente respecto a la captura de los troncos. En particular $T=1$ cuando $H/d < 1.0$; 2. T crece con la reducción de la abertura horizontal de la reja. |
| Longitud de troncos y características de las rejas | <ol style="list-style-type: none"> 1. No hay alguna aparente relación entre la abertura vertical de la reja y su capacidad de captura, o bien la abertura vertical de la reja no es influyente respecto a la captura de los troncos; 2. La disminución de la abertura horizontal disminuye T. |

Tabla 4.8 - Parámetros físicos que influyen la eficiencia de captura T (Fuente: Ishikawa, 1990).

En general se puede concluir que T aumenta si la abertura horizontal decrece, si el diámetro d y la longitud L del tronco aumentan, si disminuye el tirante hídrico h , si el caudal líquido por unidad de ancho q disminuye y si la pendiente del canal se reduce (Tab. 4.9).

| Eficiencia de captura | T | Grande ↔ Pequeño | Grado de extensión en T |
|---------------------------------------|-------|----------------------|---------------------------|
| Caudal por unidad de ancho | q | Pequeño ----- Grande | Grande |
| Pendiente del lecho del canal | I_f | Pequeño ----- Grande | Pequeño |
| Velocidad del flujo | v | Pequeño ----- Grande | Grande |
| Profundidad del flujo | h | Pequeño ----- Grande | Mediano |
| Logaritmo del diámetro | d | Grande ----- Pequeño | Mediano* |
| Logaritmo de la longitud | L | Grande ----- Pequeño | Grande |
| Abertura horizontal de la reja-grilla | H | Pequeño ----- Grande | Pequeño* |
| Abertura vertical de la reja-grilla | W | Pequeño ----- Grande | Grande |

(*) Indica el grado de efecto del rango $H/d > 1.5$

Tabla 4.9 - Efectos de la eficiencia de captura T (Fuente: Ishikawa, 1990)

La eficiencia de captura T , se puede entonces expresar a través de la siguiente relación:

$$T = (q, I_f, v, g, h, L, d, W, H) \quad (4.15)$$

Efectuando un análisis dimensional Ishikawa (1990) llega a conectar la T , que representa un parámetro adimensional, con ϑ que expresa también una cantidad adimensional y que liga los parámetros físicos considerados precedentemente,

$$\vartheta = \frac{hW^2}{dL^2} \quad (4.16)$$

concluyendo que T es inversamente proporcional a ϑ . Considerando el número adimensional de Froude al fin de correlacionar estos parámetros ya sea a la velocidad del fluido v , ya sea al caudal q , resulta una relación inversamente proporcional entre T y $(Fr \cdot \vartheta)$ y, en particular, para $H/d > 1.5$ se obtiene:

$$\begin{aligned} se \ Fr \cdot \vartheta \leq 0.8, T &\cong 1.0 \\ se \ 0.8 < Fr \cdot \vartheta < 8, T &= \log(8 / Fr \cdot \vartheta) \\ se \ 8 \leq Fr \cdot \vartheta, T &\cong 0 \end{aligned} \quad (4.17)$$

El número de Froude en correspondencia de la reja ha variado entre 0.91 y 3.0, mientras que el número de Reynolds asumió valores entre 2600 y 7900 durante las pruebas de laboratorio.

4.7.3.2 Eficiencia de captura de los diques de corrección de torrentes clásicos

Han sido considerados los diques esquematizados en la Fig. 4.37, y para cada tipología ha sido evaluada la eficiencia de captura, T , obteniendo que:

- En el caso de la tipología 1, el dique captura un cierto número de troncos entre el dique y el contradique, pero la eficiencia disminuye rápidamente con el incremento del caudal q ;
- Para un dique clásico sin contradique (caso 2), se capturan pocos troncos;
- Por el contrario, en el caso en el cual el dique dispone de reja reticular (casos 3-8) la eficiencia de captura aumenta notablemente aún cuando la función cambia en relación a la posición de la reja.

4.7.3.3 Eficiencia de captura de los diques abiertos-selectivos

En este caso ha sido evaluada la eficiencia de los diques abiertos considerando la presencia de fisuras y/o fisuras con vigas en acero cruzadas. Ishikawa (1990) evidencia una mayor capacidad de control del caudal y de la captura de los troncos de parte de los diques abiertos con vigas en acero cruzadas, mientras no varía mucho la eficiencia para las obras abiertas-selectivas con solo una fisura respecto al clásico dique de corrección de torrentes. Por lo tanto Ishikawa (1990) sugiere la necesidad de dedicar una particular atención, en el caso de realización de un diseño y proyecto, a la elección de la estructura más adecuada.

4.7.4 SEGUNDA TIPOLOGÍA DE EXPERIMENTOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE CAPTURA DE LAS OBRAS

Otra categoría de experimentos efectuados por Ishikawa (1990), consideran la eficiencia de captura de parte de diferentes tipologías de diques clásicos de corrección de torrentes y de parte de una platea. El dispositivo comprende un canal inclinado cuyas características se indican en la Tab. 4.10 y en cuya extremidad se han aplicado y simulado el comportamiento de un dique clásico de gravedad, un dique clásico de arco y una plaza de depósito (Fig. 4.40 y 4.41).

| | Longitud (m) | Ancho (cm) | Profundidad (cm) | Pendiente |
|-----------------|--------------|------------|------------------|-----------|
| Canal inclinado | 5 | 20 | 40 | 1:6 |

Tabla 4.10– Descripción del canal de laboratorio (Fuente: Ishikawa, 1990).

Planimetría



Vista lateral

Modelo de dique de retención

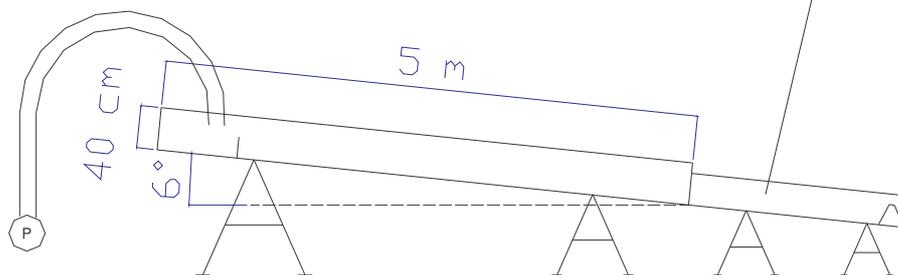


Figura 4.40 - Disposición y características del canal (Fuente: Ishikawa, 1990).

La escala longitudinal es de 1:50 y el modelo fue realizado en similaridad de Froude. El caudal considerado fue de 1.7 l/s correspondiente a un caudal de proyecto Q_p , de $30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Las características del modelo han sido realizadas reproduciendo un dique realmente existente: el Mamizudani, situado en la zona aguas arriba del río Tsuga sobre el monte Rokko. El dique Mamizudani es alto 21 metros y ancho 55 metros con un salto de 6 metros. La tipología de sedimentos utilizados comprende un D_{60} igual a 4.8 mm, y un D_{max} de 25.4 mm, buscando de respetar las características granulométricas del torrente en cuestión. Los troncos han sido simulados mediante cilindros de madera con peso específico variable entre 9000 y 9800 N m^{-3} , y con forma variable según la Tab. 4.12; durante los experimentos los troncos han sido

introducidos según la combinación de la Tab. 4.11. En total fueron introducidos 1000 troncos desde un punto situado a 1 m aguas abajo de la extremidad superior del canal; un minuto después de la introducción del caudal líquido o del caudal líquido con sedimentos y con un intervalo de 150 segundos, fueron introducidos los troncos uno después de otro.

| Tronco | Combinación | Tiempo de introducción | | 0-15 | 16-45 | 46-90 | 91-150 | Total |
|--------|-------------|------------------------|---------------|------|-------|----------|--------|-------|
| | | color | | seg. | seg. | seg. | seg. | |
| | | Diámetro (mm) | Longitud (cm) | rojo | azul | amarillo | blanco | |
| 1 | 1 | 3 | 500 | 50 | 100 | 150 | 200 | 1000 |
| | 2 | 8 | 5 | 50 | 100 | 150 | 200 | |
| 2 | 2 | 8 | 5 | 50 | 100 | 150 | 200 | 1000 |
| | 3 | 15 | 10 | 50 | 100 | 150 | 200 | |
| 3 | 2 | 8 | 5 | 50 | 100 | 150 | 200 | 1000 |
| | 3 | 15 | 10 | | | | | |
| | 4 | 15 | 18 | 50 | 100 | 150 | 200 | |

Tabla 4.11 - Combinación de troncos y orden de introducción de los mismos (Fuente: Ishikawa, 1990).

El caudal considerado estuvo caracterizado por la presencia de un 10 % de sedimento en volumen (incluido el vacío intersticial), el cual puede causar una acumulación de sedimentos aguas arriba del dique. Ha sido evaluado el caso en el cual la mitad del área aguas arriba del dique pueda ser atarquinada por sedimentos y el caso en el cual toda el área pueda ser sedimentada-colmatada. La pendiente de la zona sedimentada asume un valor de 1:12. En base a los objetivos prefijados, los experimentos han sido subdivididos en tres categorías (Tab. 4.13):

- **Experimento A:** Evalúa la eficiencia de captura, T , de un dique clásico y analiza el movimiento de los troncos y su mecanismo de depósito. Considera dos tipos de diques: un dique de control clásico de gravedad y un dique de arco;
- **Experimento B:** Evalúa la eficiencia de captura, T , de un dique clásico con presencia de reja: considera 10 diferentes tipologías de rejas como descritas en la Fig. 4.36;
- **Experimento C:** Evalúa la eficiencia de captura, T , de una platea (*water cushion pond*) con agua depositada entre el dique y el contra dique. Ishikawa (1990) analiza la T en el caso de una platea normal, en el caso de una platea ancha, y de una platea con elementos disipativos particulares.

Las pruebas fueron filmadas con videocámara y ha sido medido el tirante de agua y el depósito en correspondencia del vertedero ya sea antes del inicio de las pruebas como así también después de las mismas. Para completar los datos del experimento han sido también medidos, en el caso de los experimentos A y B, el número, la tipología y forma de los troncos y de los sedimentos transportados aguas abajo del dique. En el experimento C, han sido efectuadas las mismas medidas para evaluar donde fueron a depositarse los troncos y el sedimento en las diferentes áreas parciales de la platea. En particular, cuando el experimento considera disipadores de energía, el área de la platea fue dividida en margen derecho, margen izquierdo y zona central.

| Tipología | Longitud (cm) | Diámetro (cm) |
|-----------|---------------|---------------|
| 1 | 5 | 0.3 |
| 2 | 5 | 0.8 |
| 3 | 10 | 1.5 |
| 4 | 18 | 1.5 |

Tabla 4.12 – Tipología de troncos utilizados (Fuente: Ishikawa, 1990).

Experimento A

| Tipología de dique | Caudal Q ($l s^{-1}$) | Volumen de sedimentos | | Llenado de la zona de sedimentación | Troncos (Tab. 4.11) | N° di test efectuados | Notas |
|--------------------|---------------------------|-----------------------|----------------|-------------------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------------|
| | | % | ($l s^{-1}$) | | | | |
| gravedad | 1.3 | 0 | 0 | Lleno | 2 | 50 | Incluidos test preliminares |
| arco | 1.7 | 10 | 0.13 0.17 | Medio lleno | 3 | | |

Experimento B

| Tipología de dique (<i>boom trap</i>) | Caudal Q ($l s^{-1}$) | Volumen de sedimentos | | Llenado de la zona de sedimentación | Troncos (Tab. 4.11) | N° di test efectuados | Notes |
|---|---------------------------|-----------------------|----------------|-------------------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------------|
| | | % | ($l s^{-1}$) | | | | |
| 10 tipos diferentes (Fig. 4.36) | 1.3 | 0 | 0 | Lleno | 1 | 125 | Incluidos test preliminares |
| | 1.7 | 10 | 0.13 | Medio lleno | 2 | | |
| | | | 0.17 | | 3 | | |

Experimento C

| Tipología de platea (<i>water cushion pond</i>) | Caudal Q ($l s^{-1}$) | Volumen de sedimentos | | Tirante agua en la platea | Troncos (Tab. 4.11) | N° di test efectuados | Notas |
|---|---------------------------|-----------------------|----------------|---------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------------|
| | | % | ($l s^{-1}$) | | | | |
| Standard | 0.4 | 10 | 0.04 | Ninguna | 1 | 30 | Incluidos test preliminares |
| Ancha | 0.9 | | 0.09 | 6 cm | 2 | | |
| Con disipadores | 1.7 | | 0.17 | 10 cm | | | |

Tabla 4.13 – Descripción de las condiciones experimentales (Fuente: Ishikawa, 1990) .

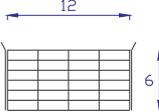
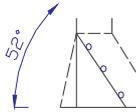
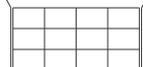
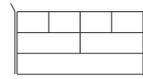
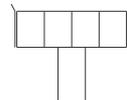
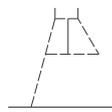
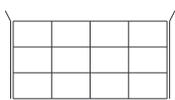
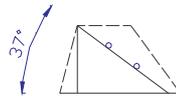
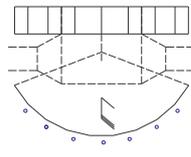
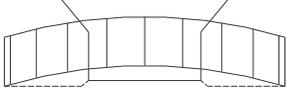
| Tipología de reja | Abertura vertical (cm) | Abertura horizontal (cm) | Vista frontal | Vista lateral | Características particulares |
|-------------------|------------------------|--------------------------|---|---|--|
| 1 | 0.7 | 2.6 |  |  | Pequeña altura de la abertura vertical |
| 2 | 1.7 | 2.6 |  |  | La altura de la abertura vertical es grande |
| 3 | 1.7 | 2.6 5.5 11.3 |  |  | La abertura horizontal es ancha en la parte inferior |
| 4 | 3.7 5.7 | 2.7 4.0 |  |  | La parte superior de la reja funciona como abertura para el dique |
| 5 | | 2.8 |  | | Ausencia de vigas transversales |
| 6 | | 3.8 |  |  | Ausencia de vigas transversales, aberturas horizontales anchas |
| 7 | | 5.9 |  |  | Ausencia de vigas transversales, aberturas horizontales muy anchas |
| 8 | 1.7 | 2.6 |  |  | |
| 9 | 5.7 | 3.8 |  |  | Tipo de dique de arco |
| 10 | 5.7 | 3.8 |  | Tipo de dique de arco | |

Figura 4.41 - Descripción de los tipos de rejas utilizados (Fuente: Ishikawa, 1990).

4.7.4.1 *Resultados experimento A*

- Movimiento de los troncos y mecanismo de depósito: La mayoría de los troncos ha sido transportado en función del tirante hídrico: donde el tirante es inferior al diámetro del tronco el tronco se deposita; los troncos transportados pueden depositarse aguas arriba del dique en la zona de sedimentación, o bien se bloquean en correspondencia del vertedero, o bien han sido transportados aguas abajo del dique. En general cuando los troncos permanecen atrapados en correspondencia del vertedero, aumenta la captura de otros troncos.
- Eficiencia de captura en la zona de sedimentación: La eficiencia de captura ha sido expresada por la siguiente relación:

$$T = \frac{\text{número de troncos retenidos en la zona de sedimentación}}{\text{número de troncos transportados a la zona de sedimentación}} \quad (4.18)$$

- De los experimentos se induce que:
 - La T del dique de gravedad y aquel del dique en arco son más o menos iguales;
 - Mayor es la longitud de los troncos mejor es la T ;
 - La T no cambia significativamente incluso cuando disminuye el caudal (ha sido disminuido de $\frac{1}{4}$ el caudal de proyecto);
 - No han sido encontradas evidentes diferencias en condiciones diferentes de llenado (avenida, media avenida, vacía) o con diferentes condiciones de flujo (con o sin sedimentos).
- Eficiencia de captura de la platea:
 - La T del dique de gravedad y aquel del dique en arco son más o menos iguales;
 - Mayor es la longitud de los troncos mejor es la T ;
 - La T no cambia significativamente incluso cuando disminuye el caudal;
 - La T no cambia significativamente incluso cuando disminuye el caudal (ha sido disminuido de $\frac{1}{4}$ el caudal de proyecto);

- No han sido encontradas evidentes diferencias en condiciones diferentes de llenado (avenida, media avenida, vacía) o con diferentes condiciones de flujo (con o sin sedimentos).

- Longitud de los troncos y eficiencia de retención: La acumulación de troncos influencia la eficiencia de captura. En todos los casos resulta mucho más importante la influencia de la longitud mayor, antes que la longitud media de los troncos considerados, en particular debido al hecho del ancho del vertedero, igual a 12 cm, comparados con los 16 y los 18 cm de algunos troncos considerados.

4.7.4.2 Resultados experimento B

También en este caso ha sido evaluada la T en la zona de sedimentación según la ecuación 4.18. La T ha sido evaluada para cada reja considerada, en base a caudales diferentes, diferentes condiciones de depósito y presencia de un cierto volumen de sedimentos en el caudal considerado.

- La eficiencia de captura no varía para las diferentes tipologías de rejillas cuando los troncos tienen grandes dimensiones, mientras el efecto cambia significativamente para troncos más pequeños;
- T aumenta con la disminución de la abertura horizontal;
- T no varía mucho si la reja es posicionada encima del dique o en la zona de sedimentación, en cada uno de estos casos la reja debe estar siempre protegida para impedir la acumulación de sedimentos;
- El nivel de llenado de la zona de sedimentación (lleno, mitad, vacío), no influye en la T ;
- Si las aberturas horizontales se reducen, las rejillas se obstruyen por los sedimentos y el flujo de agua que transporta los troncos sobrepasa la reja causando una disminución de la eficiencia de captura. Por ello es aconsejable asegurar una abertura vertical de la reja de por lo menos 3 veces la dimensión máxima de los detritos. Las mismas consideraciones pueden ser efectuadas para las aberturas horizontales;

4.7.4.3 *Resultados experimento C*

Muy útil resulta la platea con agua, para proteger las fundaciones y el fondo del cauce del río de la erosión causada por el flujo aguas abajo del dique. El experimento ha sido utilizado para evaluar la eficiencia de captura de este tipo de platea. La eficiencia de captura ha sido definida como: número

$$T = \frac{\text{número de troncos depositados en la platea}}{\text{número de troncos transportados hasta la platea}} \quad (4.19)$$

Las elecciones entre los tipos de platea utilizadas (normal, grande, con disipadores) y la eficiencia de captura han sido evaluadas concluyendo que:

- T aumenta en caso de presencia de disipadores, en particular en el caso de caudales elevados o cercanos al caudal de proyecto;
- T aumenta con la longitud de los troncos y disminuye cuando los troncos son cortos y la máxima longitud es menor a la mitad del ancho del vertedero; esto en el caso de plateas normales y anchas;
- Comparando plateas normales con plateas anchas (sin disipadores), estas últimas han sido más eficientes en términos de captura de troncos.

4.7.5 AREA DE DEPÓSITO DE LOS TRONCOS

Ishikawa (1990), considera importante poder evaluar el número de troncos que podrían depositarse en la zona de sedimentación aguas abajo del dique, con la finalidad de una mejor proyectación de estructuras adecuadas a la retención del detrito leñoso. De los experimentos efectuados, A y B, induce una relación entre el número de troncos depositados en el área de sedimentación, en particular: 6 casos considerando dique de control clásico (experimento “A”) y 12 casos de diques con rejas (experimento “B”), seleccionados éstos entre aquellos caracterizados por una mayor retención. Ha sido medida el área de los troncos depositados, considerando también el espacio que separa varios troncos, “área total de depósito” (B), y el área de todos los troncos depositados considerada proyectada sobre un plano (A). La relación entre las dos áreas ha sido llamada relación del área de depósito de los troncos, $C=B/A$. Ha sido considerada la superposición de las dos áreas para evaluar el efectivo espacio necesario

para recibir todos los troncos, “área sobrepuesta”, definida como $(100-100C)\%$. En cada uno de los tests ha sido considerada esta área y efectuada una media para cada tipología de experimento (Tab. 4.14).

| EXP. | Q (l/s) | Tipo de reja | Condición inicial de la zona desedimentación | Q sólido (%) | N _d | | | | (A) cm ² | (B) cm ² | (C) | (100-100C) % |
|-------|------------|--------------------|---|--------------------|----------------|-----|--------|--------|------------------------|------------------------|-------|-----------------|
| | | | | | 3/5 | 8/5 | 15/10 | 15/18 | | | | |
| A | 1.7 | Ninguna | Llena | 10 | 0 | 414 | 349 | 105 | 9.726 | 9.122 | 0.938 | 6.2 |
| | | | | 0 | 0 | 374 | 350 | 40 | 7.826 | 6.049 | 0.773 | 22.7 |
| | | | Media | 10 | 0 | 488 | 350 | 144 | 11.090 | 9.288 | 0.838 | 16.2 |
| | | 0 | 0 | 465 | 350 | 129 | 10.593 | 8.665 | 0.819 | 18.1 | | |
| | | Vacía | 10 | 0 | 468 | 350 | 136 | 10.794 | 9.496 | 0.880 | 12.0 | |
| | | | | 0 | 0 | 426 | 350 | 80 | 9.114 | 8.181 | 0.898 | 10.2 |
| Media | | | | | | | | | | | 0.858 | |
| 14.2 | | | | | | | | | | | | |
| B | 1.7 | 6 | Llena | 10 | 442 | 441 | 0 | 0 | 2.427 | 1.647 | 0.679 | 32.1 |
| | | | | 0 | 0 | 460 | 491 | 0 | 9.205 | 8.651 | 0.940 | 6.0 |
| | | | | 0 | 0 | 455 | 350 | 143 | 10.931 | 10.866 | 0.994 | 0.6 |
| | | Media | 0 | 466 | 450 | 0 | 0 | 2.499 | 1.308 | 0.523 | 47.7 | |
| | | | 0 | 0 | 494 | 500 | 0 | 9.476 | 6.367 | 0.672 | 32.8 | |
| | | 0 | 0 | 481 | 350 | 150 | 11.224 | 8.741 | 0.779 | 22.1 | | |
| | | 1 | Media | 10 | 0 | 500 | 500 | 0 | 9.500 | 6.104 | 0.643 | 35.7 |
| | | | | 0 | 0 | 499 | 350 | 150 | 11.296 | 9.177 | 0.812 | 18.8 |
| | | 8 | Media | 0 | 0 | 479 | 496 | 0 | 9.356 | 5.606 | 0.599 | 40.1 |
| | | | | 0 | 0 | 495 | 350 | 144 | 11.118 | 7.378 | 0.664 | 33.6 |
| | 1 | Llena | 0 | 0 | 497 | 500 | 0 | 9.488 | 6.866 | 0.724 | 27.6 | |
| | | | 0 | 0 | 500 | 350 | 150 | 11.300 | 6.686 | 0.592 | 40.8 | |
| Media | | | | | | | | | | | 0.718 | |
| 28.2 | | | | | | | | | | | | |

Tabla 4.14 - Área de sobreposición de los troncos retenidos en la zona de sedimentación (Fuente: Ishikawa, 1990).

Analizando la Tab. 4.14 resulta evidente que la relación entre el área de depósito de los troncos (C) se distribuye según un intervalo que varía entre 0.523 y 0.994 y resulta siempre inferior a 1; el área de superposición es también muy variable y asume valores entre 0.6 e 47.7 % y, de todos modos, siempre mayores de 0. Considerando entonces la media, no se logra encontrar espacio entre los troncos. En conclusión, el área de la zona de sedimentación para un dique clásico con reja, dado un número N_d de troncos hipotéticamente depositados, puede ser obtenida mediante la:

$$S_d = C \cdot S_C \quad (4.20)$$

En donde S_d es el área de la zona de sedimentación del dique con rejas considerando un número N_d de troncos depositados; C es la relación del área de deposición de los troncos calculada en base a los experimentos; S_C es la suma de las áreas proyectadas de los N_d troncos calculada como:

$$S_C = \sum_{i=1}^{N_d} (D_{\log} \cdot L_{\log})_i \quad (4.21)$$

Es por lo tanto necesaria una zona ancha de sedimentación para un elevado número de troncos. Ishikawa (1990) concluye que la eficiencia de captura de parte de diques con rejas, aumenta notablemente en presencia de una zona de sedimentación ancha, o bien de una platea aguas abajo de la cuenca de sedimentación.

4.8 MODELOS DE OBRAS EN SUIZA

En los últimos decenios, eventos de crecida de elevada magnitud que se han verificado en Suiza ha puesto en evidencia el potencial destructivo de los detritos leñosos que causan la obstrucción de puentes, canales y secciones de cauce. A continuación de estos eventos, nuevas estructuras de retención de troncos y detritos han sido desarrolladas.

Durante los eventos de avenida, difícilmente el transporte de detritos leñosos ocurre separadamente del resto del transporte sólido, en consecuencia, las soluciones han sido estudiadas para una retención combinada de material flotante y sedimento en las cuencas de retención o en las áreas de depósito. Con tal propósito diferentes modelos experimentales de

laboratorio en escala reducida y simulaciones en escala real han permitido estudiar el fenómeno para verificar la validez de nuevas estructuras. Entre las diversas estructuras los mejores resultados han sido obtenidos por las “*rack structure*”, por los disipadores y por las “*downflow baffle solutions*”; es decir, diques u obras con fisuras caracterizadas por disponer aguas arriba de grandes superficies de acumulación, utilizadas para la retención del material detrítico flotante. Ambas tipologías de obras son utilizadas o singularmente o aplicadas a otros diques ya existentes, aumentando la eficacia de retención de los troncos y detritos leñosos (Bezzola y Otros, 2004). Se exponen a continuación imágenes de obras experimentales con prototipos en escala real y estudios efectuados en varias zonas de Suiza (fig. 4.42, 4.43 y 4.45) y los relativos efectos (fig.4.44 y 4.46).



Figura 4.42 - Dique a fisura sobre el torrente Sigetsbach (Cantón Obwalden) (Bezzola y Otros, 2004).



Figura 4.43 - Obra para la retención de la madera utilizada en proximidad de un dique ya existente en el torrente Edisriedbach cerca de Sachseln (Cantón Obwalden) (Bezzola y Otros, 2004).

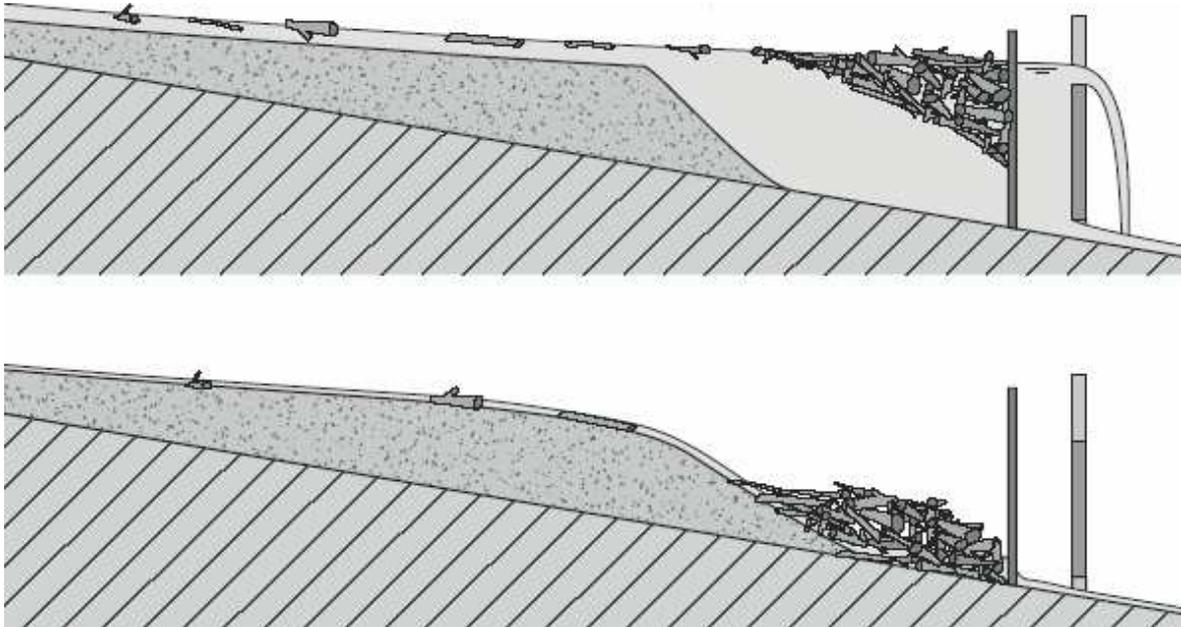


Figura 4.44 - Separación de los detritos leñosos a causa de la “backwater” o sea de la curva de remanso y del embalse que se crea aguas arriba de la acumulación del material flotante; a) funcionamiento en condiciones de crecida considerando caudales máximos; b) funcionamiento durante la fase final de la crecida, (Bezzola y Otros, 2004) .

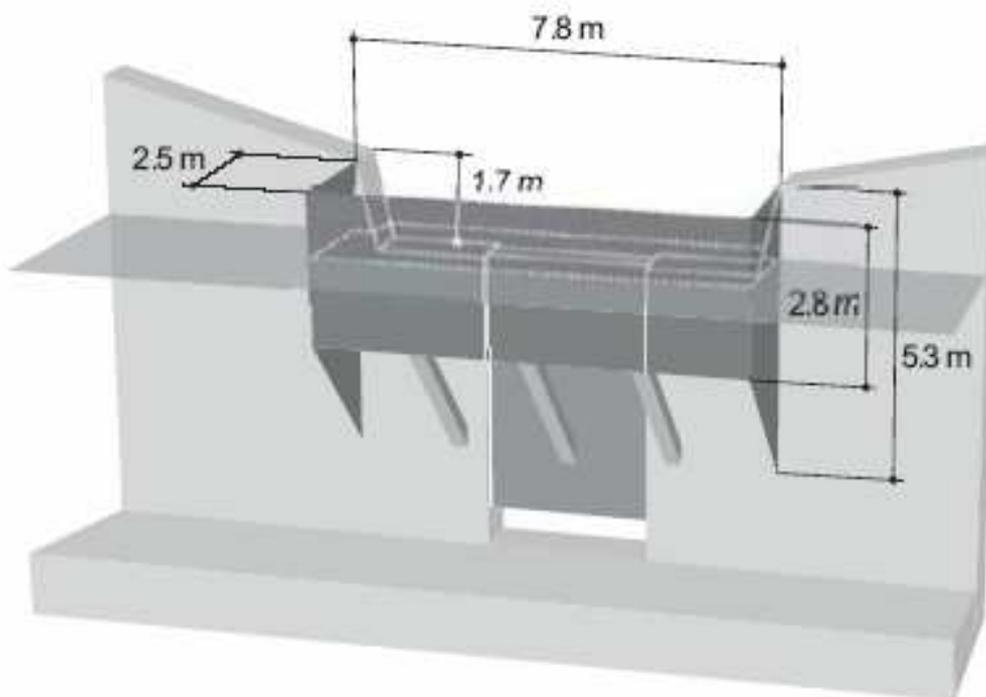


Figura 4.45 - Esquema de un proyecto de *Downflow baffle*, (Bezzola y Otros, 2004).

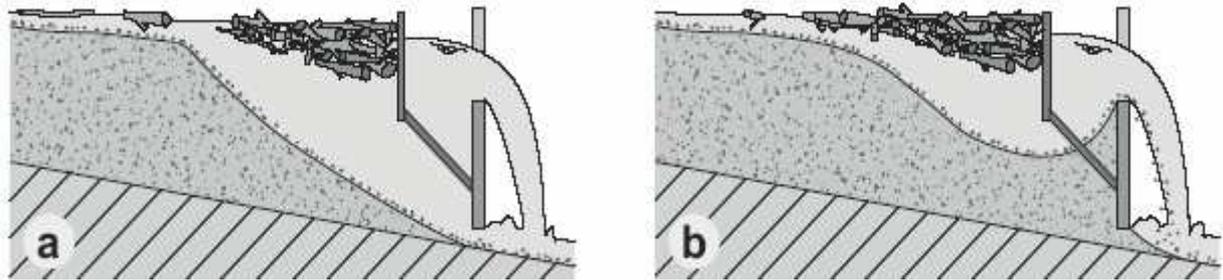


Figura 4.46 - Condiciones de funcionamiento en correspondencia del “Downflow baffle”; a) Descarga libre en correspondencia de la abertura de fondo situada en la parte inferior del dique; b) Abertura y borde inferior obstruido por la acumulación de sedimentos, la cual ocupa todo el paramento de aguas arriba del dique (Fuente: Bezzola y Otros, 2004).

4.8.1 MODELOS EXPERIMENTALES

Como citado precedentemente, eventos catastróficos han llevado a la creación de modelos de laboratorio y simulaciones en escala real para el estudio de la retención del material leñoso.

Sobre el río Enziwigger (cantón Luzern), con el fin de prevenir la formación de grandes acumulaciones de troncos y detritos leñosos, se ha pensado en utilizar aguas arriba en el canal principal de conducción, dos diques a red (*rope net constructions*) dispuestos perpendicularmente a la dirección del flujo para retener la madera transportada (Fig. 4.47-4.48). Una abertura de 0.50 metros de altura entre el borde inferior de la red y el lecho del río ha sido dejado con el fin de asegurar el pasaje del caudal líquido y del transporte de fondo en condiciones de flujo medias-bajas. No obstante, tests de laboratorio y simulaciones hidráulicas efectuadas ad-hoc, han demostrado que el caudal máximo de proyecto es demasiado elevado para las condiciones al contorno propuestas, por lo cual se propusieron soluciones alternativas más idóneas (por ejemplo *V-rack*).



Figura 4.47 - Modelos en escala real (cantón Luzern) (<http://www.vaw.ethz.ch>).



Figura 4.48 - Modelo físico para el estudio de la retención de la madera del río Enziwigger (cantón Luzern) (<http://www.vaw.ethz.ch>)

En Agosto del 1997 una tormenta causó graves daños en el pueblo de Sachseln en Suiza central. Después de una lluvia muy intensa de 2 horas de más de 100 mm, el río se desbordó llevando a gran parte del pueblo una gran cantidad de agua, sedimentos y detritos

leñosos. Esta inundación fue causada por la insuficiente capacidad del canal y el bloqueo de algunas secciones del torrente por el material leñoso flotante.

Como intervención inmediata fue propuesto la realización, aguas arriba del pueblo, de un dique filtrante, de una *trash rack* para la retención de la madera, y de una cuenca de sedimentación con gran capacidad de acumulación (Fig. 4.49). La obra fue propuesta para retener una parte de la madera que fluía y sobre todo para retener los grandes troncos transportados. A causa de la complejidad del funcionamiento hidráulico en la cuenca de sedimentación, el laboratorio VAW de hidráulica, hidrología e glaciología VAW (http://www.vaw.ethz.ch/index_EN), efectuó un modelo físico para testar y optimizar la *trash rack* (Fig. 4.50).

Los experimentos han permitido de evaluar este tipo de obras como sumamente adecuadas y útiles en la práctica. Sucesivamente, ha sido posible evaluar en campo el positivo efecto de retención de detritos leñosos de la crecida de menor envergadura del 1998, con troncos retenidos de longitudes mayores de 2,5 m.



Figura 4.49 - Estructura *trash rack* para la retención del material leñoso en el torrente Dorfbach cerca Sachseln (Cantón Obwalden, Suiza), (<http://www.vaw.ethz.ch>).



Figura 4.50 - Modelo físico de laboratorio para el estudio de la retención de detritos leñosos por parte de una *trash rack* en el torrente Dorfbach (Cantón Obwalden, Suiza) (<http://www.vaw.ethz.ch>)

Las inundaciones del 1990 causaron graves daños en el valle del Río Gurbe como consecuencia de la obstrucción de varios puentes de parte de grandes cantidades de detritos leñosos y de troncos flotantes. Para controlar el transporte del material flotante se utilizó una estructura compuesta por un dique y una *trash rack* para la retención de material leñoso, las cuales cierran una amplia cuenca de acumulación, de depósito y de sedimentación situada aguas arriba. Con la finalidad de minimizar los posibles efectos de creación de una curva de remanso demasiado alta y de un embalse aguas arriba en situaciones de máximo caudal, y también de evitar la posible obstrucción total de la estructura, ha sido proyectado, lateralmente y aguas abajo de la estructura, un *bypass*. También en este caso modelos físicos han sido utilizados para testar la validez de la estructura en su conjunto.

Estos tests han demostrado que el transporte de los troncos durante un evento extremo pueden alcanzar una capacidad tal de poder causar el paso de los mismos también a través del *bypass*. Por este motivo han sido evaluadas soluciones alternativas entre las cuales se pudo observar que la mejor combinación de obras consiste en un funcionamiento y en una acción conjunta entre una *trash rack* y un *downflow baffle* a la entrada del *bypass*; solución que permite la captura de casi toda la madera transportada (Fig. 4.51 y 4.52).



Figura 4.51 - Combinación de dispositivos para la retención de la madera en el río Gurbe (*trashrack* y *downflow baffle*) (<http://www.vaw.ethz.ch>).



Figura 4.52 – Ejemplo de estructuras para la retención de material flotante (Cantón di Zurigo) (Fuente: Moulin y Piegay, 2004).

Otra situación digna de mención es aquella que se ha verificado en el río Steinibach, en el cual, la presencia de diques de corrección de torrentes en secuencia, se ha revelado insuficiente para la protección de la ciudad de Hergiswill, de las grandes avenidas que transportan material flotante y sedimentos.

Con el fin de optimizar el sistema y alcanzar un buen grado de seguridad aguas abajo de estas estructuras, ha sido desarrollado un modelo de laboratorio en escala 1:35, considerando la similitud de Froude. La solución óptima estudiada consiste en un simple dique de corrección de torrentes de retención y en dos diques abiertos: el primero de ellos tiene la función principal de captura de sedimentos, el segundo, situado un poco más aguas abajo, en cambio funciona con la finalidad de retención de la madera. Este último, además, ha sido protegido mediante una red central más otras dos redes situadas a los lados con el fin de interceptar velozmente el ramaje, en modo tal de crear como un muro de material flotante el cual facilita la captura de otro material.

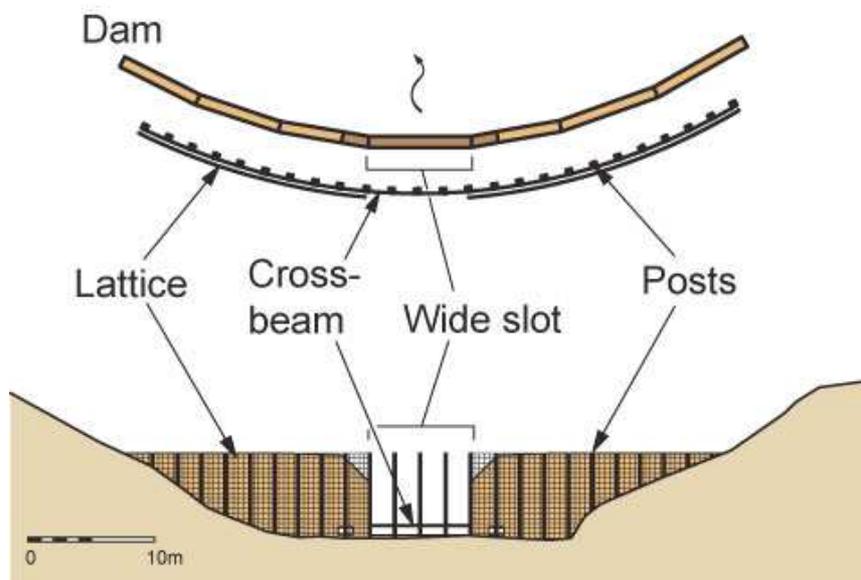


Figura 4.53 - Esquema de *trash rack* (Hergiswil, Río Steinibach, Suiza) (<http://www.vaw.ethz.ch>).



Figura 4.54 - Modelo físico para el estudio de la retención de la madera (Hergiswil, Suiza) (<http://www.vaw.ethz.ch>).

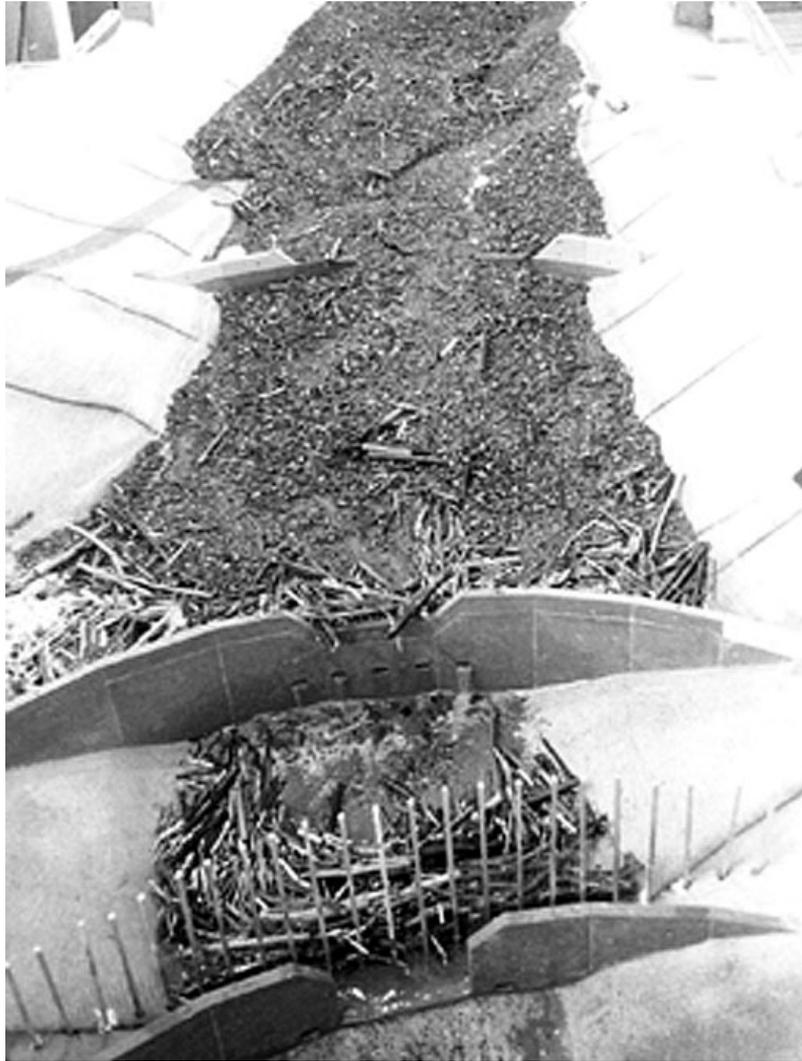


Figura 4.55 - Modelo físico de un canal para el estudio de la retención de la madera, (Hergiswil, Suiza) (<http://www.vaw.ethz.ch>).

4.9 EXPERIENCIA FRANCESA

En Francia es desde hace un decenio que diferentes investigadores (Moulin y Piegay, 2004) se están ocupando del transporte de cuerpos y material flotante en la cuenca del Río Isère. La colaboración entre diferentes instituciones entre las cuales la EDF (Eléctricité de France), la AERMEC (Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse), el DDE (Directions Départementales de l'Équipement), la DIREN Rhône Alpes, han permitido estudiar las intervenciones evaluando la tipología de detritos presente, los lugares preferenciales de

depósito, el origen del material flotante, con la finalidad de establecer una relación entre los volúmenes de detritos en movimiento y las características hidráulicas del curso de agua. La aplicación de los conocimientos hasta ahora logrados ha permitido la construcción de estructuras para la gestión de los detritos y de la madera. La función principal de estas estructuras es la de retener los detritos para impedir que puedan llegar a tramos situados aguas abajo donde podrían obstruir puentes y otras infraestructuras (Fig. 4.57). Algunos ejemplos de realizaciones concretas se pueden citar en la zona de Pontcharra, cerca de Grenoble, en donde, en una zona que había sido sujeta a ensanchamiento del cauce para favorecer el depósito del material flotante, han sido incorporadas estructuras a peine (a rastrillo) al fin de aumentar la retención del material. En el Río Adour han sido utilizadas estructuras diferentes para retener el sedimento en suspensión: redes (Fig. 4.56/a) y barreras flotantes (Fig. 4.56/b).



Figura 4.56 – Ejemplos de intervenciones destinadas a la retención de detritos flotantes en el Río Adour: (a) redes, (b) barreras flotantes (Fuente: Moulin y Piegay, 2004) .



Figura 4.57 – Vista del puente de Montmélian en 2001 (Fuente: Moulin y Piegay, 2004) .

4.10 BIBLIOGRAFÍA

- Abbe, T.B., Montgomery, D.R., (1996). Large woody debris jams, channel hydraulics, and habitat formation in large rivers. *Regulated Rivers* 12, 201–221.
- Bezzola, G. R., Sigg, H. & Lange D., (2004). Driftwood retention works in Switzerland. *Internationales Symposium, Interpraevent 2004 – Riva / Trento*.
- Cerato, M., (1996). Sulla progettazione ed il funzionamento della briglie filtranti. In S. Fatterelli S., Fedeli E.C. e Nardin D. (eds). *Atti del Corso Sviluppo e Gestione dei Bacini Idrografici*, Istituto Italo Latino Americano – AIDI-PAT, pp. 73-87.
- Cerato, M., (1999). Contributi per una storia delle sistemazioni idrauliche e forestali in Valsugana. –Provincia Autonoma di Trento- Azienda Speciale di Sistemazione Montana.
- D’Agostino, V., Degetto, M., Righetti, M., (1999). Experimental investigation on open check dams for coarse woody debris control. *Dynamics of water and sediments in mountain basins*. Editoriale bios.
- Fattorelli S. (1972). Tipo sperimentale di briglia a contrafforti, *Monti e Boschi*, 5, pp. 15-22.
- Fattorelli S., Mazzalai P. (1982), Sistema integrato di piazza di deposito e broiglia a funi per la regolazione del torrente Sarca, *Economia Montana*, XIV (3), pp. 3-7.
- Ferro, V., Dalla Fontana, G., Pagliara, S., Pugliesi, S., Scotton, P., (2004). *Opere di sistemazione idraulico-forestale a basso impatto ambientale*. Edizioni Mac-Graw-Hill.
- Fiebiger G. (1986). Bedload management on torrent control by functional check dams, *Beitrag zur Wildbacherosions und Lawinenforschung*, Mitt. Der FBVA, vol. 159, 325-332.
- Gagoshidze M.S., (1969). Mud streams and floods control. *Gidroteknika i meliorazya*. N°. 11.
- Genet E. (1953). Un nouveau type de barrage de correction: le barrage-peigne, *Compte rendu général du voyage d’études dans les Alpes Française du Groupe de Travail FAO/EFC/TORR*, 1° session, 1952, Nancy.

GEOBRUGG (2006). <http://www.geobrugg.com>

Ishikawa, Y. (1990). Studies on disasters caused by debris flows carrying logs down mountain. SABO Division, Public Works Research Institute, Ministry of Construction.

Kettl, W., (1989). Evoluzione delle sistemazioni idraulico forestali: dallo scopo della sistemazione allo sviluppo delle tipologie costruttive. *Quaderni di idronomia montana*, 8, pp. 35-65.

Kronfellner-Kraus, G., (1970). Über offene Wildbachsperren. Mitt. Der FBVA, 88, pp. 8-76.

Kronfellner-Kraus, G., (1972). Neue Bauweisen in der Wildbach- und Lawinenverbaunung in internationaler Sicht. *Centralblatt für das Gesamte Forstwesen*, 89 (1), pp. 33-57.

Leys, E., (1971). Die Bedeutung der grossdoligen und kronessoffenen Bauweise in der Wildbachverbaunung zur Vorbeugung von Hochwasser-und Murschaeden. *Interpraevent Villach*, pp. 441-449.

Meyer-Peter E. & Müller R., 1948. Formulas for bedload transport. *Atti 2nd Meeting Intl. Ass. Hyd. Structures Res.*, Stockholm, Sweden, Appendix 2, 39-64.

Mizuhara, K (1975). On the Sabo-dam and Drift woods (I): The mechanism of initial accumulation and motion of drift woods, *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, Vol. 28, N° 2, pp. 17-24.

Mizuhara, K. (1976). On the Sabo-dam and Drift Woods (II): The mechanism of drift woods accumulation and dam-up caused by them, *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, Vol.28, N° 17-23.

Mizuhara, K., Minami, N. & Takei A., (1979). Fundamental Study on the Check of Drifting Woods (I)-On the moving form of the group of drifting woods, *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, Vol.32, N° 2 ,pp 10-16.

Mizuhara, K., Minami, N. & Takei A., (1980). Fundamental Study on the Check of Drifting Woods (I)-On the impulsive force and the rate of check of drifting woods at the stockade, *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, Vol.32, N° 3 ,pp 9-16.

- Monnet P. (1960), La lutte contre l'inondation doit être préventive et non curative, La technique de l'Eau et de l'Assainissement, 3.
- Moulin, B. & Piegay, H., (2004). Les corps flottant dans le bassin versant de l'Isère: Proposition pour une gestion durable. Plaquette finale.
- Palkowski, S., (1990). Statik der Seikonstruktionen ; Sprinter-Verlag.
- Provincia Autonoma di Trento, (1991). Per una difesa del territorio. La sistemazione dei bacini montani in provincia di Trento attraverso i secoli. Azienda Speciale di Sistemazione Montana.
- Puglisi S. (1968), Resoconto delle esperienze in corso con dispositivi filtranti in alcuni torrente dell'Appennino Lucano, *L'Italia Forestale e Montana*, Vol.XXIII, 6, pp.26-73.
- Puglisi S. (1967), L'impiego dei dispositivi filtranti nella correzione dei torrenti. Nota introduttiva, *L'Italia Forestale e Montana*, XXII, 1, 12-24.
- Puglisi S. (1977), Caratteri degli interventi di sistemazione idraulico-forestale, In Bagnaresi, U., Suggelli, A., Pugliesi S., *La sistemazione del suolo nei territori montani*, Ed agricole, 29-45.
- Rimbock, A., (2004). Design of rope net barriers for woody debris entrapment. Introduction of a design concept. *Internationales Symposion, Interpraevent 2004 – Riva / Trento*.
- Sasaki, H., (1962). Checking of flowing timbers neighbouring. *Faculty of engineering, Shinshu University. Bulletin N° 13*, pp. 59 thru 89.
- Seno, K., Takahisa, M., Akira O. & Shinji, U., (1984). Movement of logs in debris flows and log-traps. *Civil Engineering Journal*, vol. 26, N°. 2, pp. 9-13.
- Smart G.M. & Jaeggi M., 1983. Sediment transport on steep slopes. *Hidrologie und Glaziologie, V.A.W., Mitteil 64, ETH, Zurich*, pp 191.
- Üblagger, G., (1972). Retendieren, Dosieren und Sortieren. *Kolloquium über Wildbachsperren, Mitt. FVBA Wien, Bd. 102*, pp. 335-372.

Uchiogi, T., Shima, J., Tajima, H., Ishikawa, Y., (1996). Design methods for wood-debris entrapment. Proceedings Int. Symp. *Interpraevent Garmisch Partenkirchen*. 5:279-288.

Zedlacher, D., Jedilitschka, M., Diera, N., Fiebiger, G., (1979). Sommerstudienreise Salzburg. Wildbach- und Lawinwinwienverbau, Sonderheft. April 1979, pp. 3-42.

EPIC FORCE - UNIPD *El control de detritos leñosos y el manejo de la vegetación en el cauce*

Lenzi M.A., Comiti F., Mao L., Andreoli A., Pecorari E., Rigon E., Picco L.

5 EL MANEJO DE LA VEGETACIÓN EN EL CAUCE

En ocasión de avenidas importantes, las plantas vivas y los detritos vegetales arrastrados por la corriente pueden causar daños importantes. Muy a menudo son los mismos detritos flotantes que provocan la obstrucción de puentes (u otras secciones limitadas) que a su vez son causa de desviaciones de la corriente y desbordamientos. La formación de grandes acumulaciones de detrito vegetal en correspondencia de secciones transversales estrechas, es particularmente peligrosa, ya que estas barreras temporáneas pueden improvisamente colapsar bajo la creciente presión del agua acumulada aguas arriba. Estas circunstancias, en torrentes y ríos de montaña pueden causar la formación de fuertes ondas con elevado transporte sólido (lavas torrenticias o *debris flow*), caracterizadas por elevadas concentraciones de sedimentos, velocidad, capacidad erosiva y violencia de impacto. Aparece entonces útil y necesario intervenir sobre la vegetación en el cauce y en sus márgenes, con la finalidad de mitigar estos posibles efectos negativos.

Por otra parte, no pueden ser descuidadas las ventajas derivadas por la presencia de la vegetación de ribera en las orillas de los cauces (que proporcionan fuertes efectos de consolidación, de disminución de la velocidad del agua, etc.). La problemática de un correcto manejo de la vegetación de ribera es entonces la de encontrar el compromiso más equilibrado en las intervenciones, al fin de atenuar y posiblemente eliminar los efectos negativos y optimizar las funciones positivas de la vegetación en los cauces. La presencia de vegetación en los cauces desde una perspectiva puramente hidráulica, que tiende a considerar los torrentes como canales y considera primariamente las necesidades de seguridad hidráulica, aparece más un problema que un recurso. En este sentido, la vegetación ha sido primariamente considerada un obstáculo al flujo, y el problema de su gestión ha sido reducido a aquel de su eliminación. Considerando las múltiples ventajas que una cobertura vegetal en los cauces y en sus orillas garantiza, parece en cambio cuanto más útil pasar a una concepción de tratamiento de la vegetación que tenga la finalidad de favorecer la evolución hacia una cenosis especializada, apta a las particulares condiciones y exigencias del cauce, de las orillas y de las vertientes en proximidad al cauce. Se trata entonces de entender que el torrente ideal no es aquel privado de vegetación, si no aquel con un cierto tipo de cenosis vegetal en equilibrio con las condiciones

locales específicas (Della Giacomina, 2004), sin olvidar por supuesto las exigencias de seguridad hidráulica, que siempre tienen que ser el objetivo primario de las intervenciones.

Considerando lo dicho, se considera oportuno en esta sede explicitar mayormente las funciones de la vegetación de ribera en los cursos. En lo específico serán subrayadas las ventajas de la presencia de la vegetación de ribera y de las mutuas interacciones entre ésta y las características hidrológicas, hidráulicas, morfológicas y sedimentológicas del ambiente que les rodea. En seguida se presentará la descripción de la normativa de gestión de vegetación en los cauces actualmente en vigor en Italia en dos de sus Regiones.

5.1 VENTAJAS DE LA PRESENCIA DE LA VEGETACIÓN EN EL CAUCE

Como indicado anteriormente, la presencia de vegetación en los cauces comporta ventajas relativas a diferentes aspectos del funcionamiento y de la dinámica de los mismos. En una nota del Servicio de Sistemación Montana de la Provincia Autónoma de Trento (Italia) se recogen las más importantes entre las ventajas proporcionadas por la vegetación de ribera:

- *Estabilización de terrenos sueltos:* La cobertura vegetal, por medio de la presencia de raíces, garantiza una importante y duradera protección contra la erosión superficial. Además, la presencia de la vegetación mejora la estructura del suelo, a través de las acciones de las raíces y del aporte de materia orgánica, favoreciendo la formación de agregados pedológicos más resistentes. Este efecto es producido, de modo diferente, por cualquier tipo de vegetación herbácea, arbustiva y arbórea, según las características del aparato radical y de la materia orgánica que cada cenosis produce. Particularmente eficiente resulta la vegetación arbustiva riparia especializada, sobretodo alisos y sauces. Estas especies se caracterizan por aparato radical profundos y bien desarrollados, son resistentes a las inundaciones y al enterramiento, y tienen capacidad de rebrote elevada que garantiza una rápida recuperación después del corte. Aún más, si la vegetación arbustiva es manejada a intervalos regulares y no llega a alcanzar dimensiones excesivas, los troncos son dotados de notable flexibilidad y resistencia en la fase juvenil, y tienen una elevada capacidad colonizadora. Evidentemente menos eficaz en la estabilización del suelo es el efecto de la vegetación herbácea. También la eficacia de la vegetación arbórea de coníferas es reducida, por causa de la conformación superficial del aparato radical y de las grandes dimensiones

que pueden alcanzar (transmitiendo al terreno fuertes sollicitaciones por efecto del propio peso y del viento);

- *Disminución de la velocidad de la corriente:* El efecto hidráulico de la presencia de vegetación en las orillas o en las barras centrales o laterales de los cauces, es principalmente de disminución de la velocidad de la corriente. Se trata de un efecto positivo, con la única condición de que la sección sea suficiente para el flujo en caso de avenidas. El dimensionamiento de la sección de un cauce debería, en todos casos, ser realizado con criterios de seguridad, previendo márgenes de seguridad importantes. Un caso particular es aquel de canalizaciones que atraviesan centros habitados: en estos casos la disminución de la velocidad de la corriente puede tener un efecto negativo, ya que se acentuaría la insuficiencia de la sección de desagüe, pudiéndose depositar material sólido en el lecho. Desde la perspectiva primariamente hidráulica, es importante que la vegetación sea autóctona y esté en equilibrio dinámico con el ambiente, o sea flexible, resistente a las sollicitaciones de la corriente y a que soporte inundaciones temporales. Es esencial que la vegetación no alcance grandes dimensiones, para evitar que avenidas importantes puedan removerlas y transportarlas aguas abajo, con todos los efectos negativos ya citados;
- *Mejoramiento biológico-ambiental:* La calidad del agua es ligada por una parte a la inmisión de sustancias contaminantes desde surgentes (puntuales o distribuidas) externas al cauce y por otra a la capacidad de auto depuración de los ríos. Ésta es proporcionada por la capacidad de los sedimentos del lecho de filtrar y depositar los contaminantes, por el grado de oxigenación del agua (auto depuración física) y por la acción depuradora de la comunidad vegetal y animal de los ambientes acuáticos y de los ambientes ripariales (auto depuración biológica). Cuanto más compleja es la biocenosis acuática (el número de especies que la componen es una buena medida de comparación) tanto mejor es la capacidad de depuración biológica. Un cauce en condiciones naturales se caracteriza por una gran variabilidad de hábitat y condiciones en breves espacios, por efecto de la alternancia de grandes piedras y de depósitos de arena, de saltos y remansos, de tramos con elevada velocidad y saltos (oxigenación) y zonas de estancamiento y de sombra, y por la presencia de una cobertura vegetal mixta. En estas condiciones, a una elevada diversidad ambiental corresponde una elevada diversidad de especies vegetales y animales. Al extremo opuesto, en un canal

rectificado y revestido la homogeneidad de los hábitats y de las condiciones (velocidad, temperatura y calado del agua) permiten la sobrevivencia de un número muy limitado de especies. La simplificación de la estructura de la biocenosis provoca en este caso una limitación muy importante de la capacidad de auto depuración de las aguas. En este sentido, el efecto positivo de la presencia de vegetación en los cauces es muy importante, explicitándose como aumento de la irregularidad en los lechos, creación de pequeños recodos y áreas de disminución de la velocidad corriente, mejora del sustrato, alternancia de luces y sombras, input de sustancia orgánica en el hidrosistema. En conjunto se instaura una condición de variabilidad de microambientes que permite la vida a una cenosis más compleja.

- *Efecto estético-paisajístico*: Es quizás el aspecto más evidente y de más inmediata percepción. El efecto de la presencia de la vegetación (de modo particular sobre las orillas) es el de crear la impresión de un ambiente natural, no contaminado por la obra del hombre: esto es hoy inmediatamente percibido como bello. La importancia de los torrentes y de las zonas riparias como elementos del paisaje (en términos estéticos, pero también ecológicos) es evidente. De esto deriva la necesidad de tener muy en cuenta las actividades de ordenación de estos conjuntos. La necesidad de proteger, mejorar y seguir la dinámica evolutiva de estos ambientes en termino de valor paisajista de los mismos es probablemente destinada a aumentar en el futuro próximo y a representar un factor de grande importancia en el determinar la actitud de la opinión pública hacia la ordenación.

5.2 ORDENACIÓN DE LA VEGETACIÓN EN EL CAUCE

Dada las ventajas debidas a la presencia de vegetación en el cauce, su ordenación es de tener en cuenta como el instrumento principal de valoración de las mismas. Considerando primariamente el ambiente donde la cubierta florística vegeta, en las correcciones de cauces de ríos y torrentes se deberán considerar los siguientes aspectos:

- En la elección del tipo de intervención se deberán preferir, cuando posible, las soluciones de tipo naturalístico (limitando a lo estrechamente indispensable la construcción de canalizaciones y diques) y a aquellas más respetuosas para el ambiente natural;

- Respetar las áreas de expansión natural, muy útil también desde un punto de vista estrechamente hidráulico, ya que la disminución de la velocidad de la corriente favorece la deposición de los sedimentos transportados por la corriente;
- Salvaguardar la vegetación riparia natural;
- Conferir al cauce una conformación con características variables y similares a aquellas del ambiente natural, dejando al mismo tiempo el espacio suficiente para que el cauce pueda autónomamente y dinámicamente llegar a una conformación plano-altimétrica estable.

Por lo que más estrictamente concierne la vegetación, verificada la condición de que las secciones sean suficientes al flujo, es oportuno favorecer la difusión de una vegetación de ribera especializada:

- En la parte del cauce sujeta al flujo de las crecidas con recurrencias media-altas (entre 30-50 años) deberá ser mantenida una cenosis con especies de troncos flexibles y resistentes a las inundaciones temporáneas;
- Vegetación arbórea más desarrollada externamente a los cauces y en los diques.

Para cada cauce (y para cada tramo) deberá ser definido un objetivo sobre la base del estudio de sus características. El tipo de vegetación óptimal variará según las características de la estación, del caudal, de sus variaciones, de la pendiente, de la sección de flujo, etc. El tratamiento sucesivo de la vegetación tendrá como objetivo el mantenimiento de la cenosis, evitando por tanto la evolución hacia tipos con la presencia de coníferas y la introducción de otras especies no especializadas o exóticas. El mantenimiento de una frecuente renovación de las plantas, a través de cortas selectivas permitirá mantener la cenosis en un estadio juvenil (con fustos flexibles y nunca de grandes dimensiones) mejorando al mismo tiempo la radicación y exaltando la capacidad polonífera de la especie.

Tratándose de un tratamiento y no de la eliminación de la vegetación del cauce, el personal (que debe ser experto en este tipo de trabajo) deberá ser en grado de:

- Intervenir correctamente para mantener/modificar la cenosis;

- Evaluar los efectos estéticos de la intervención, evitando el corte raso sobre una superficie excesivamente extendida (buenos resultados puede dar el corte raso sobre tramos de 30-50 m);
- Realizar el corte en modo técnicamente correcto, favoreciendo la rápida renovación vegetativa espontánea.

Finalmente, a este propósito, es oportuno recordar los efectos negativos que un tratamiento no correcto de estas cenosis pueden llevar. Además de los vistosos efectos paisajísticos claramente negativos, a menudo un corte a raso indiscriminado tiene una evolución hacia asociaciones monoespecíficas. También el tratamiento de la vegetación, sobre todo aquella forestal, en las proximidades externas de los cauces deberían ser objeto de valoraciones particulares. Recordando que la presencia de troncos (LWD) en la corriente puede constituir un elemento de grave peligro en la dinámica de una avenida, la ordenación forestal en estas áreas deberá tener en cuenta la posibilidad que troncos y otros detritos vegetales de grandes dimensiones lleguen al cauce. Bajo estas circunstancias, las prioridades son de presencia de especies arbóreas que proporcionen más beneficios de estabilidad que estrictamente de productividad, lo que, concretamente, significa privilegiar las latifolias más que las coníferas, evitar la presencia de sujetos de grandes dimensiones (turnos relativamente cortos), dar preferencia a los sujetos más estables respecto a aquellos tecnológicamente mejores. Esto obviamente no significa eliminación del bosque (o su desnaturalización) a lo largo de las orillas, pero significa un atento examen de las condiciones de cada tramo del torrente y de sus márgenes para individuar las potencialidades de peligro por presencia de vegetación.

5.3 INTERACCIONES CAUCE-VEGETACIÓN

Como anteriormente citado, cualquier tipo de intervención en los cursos de agua presupone un adecuado conocimiento del sistema físico y de los principales fenómenos que en él se desarrollan. En función de los objetivos previstos es necesario definir las características hidrológicas e hidráulicas (régimen del caudal, resistencia al flujo), morfológicas (secciones transversales, perfil plano-altimétrico) y sedimentológicas (transporte sólido, granulometría), sobre la base de los datos disponibles integrados eventualmente con campañas de relieves de campo. La cuantificación de los efectos determinantes de la vegetación en los cauces fluviales,

presente naturalmente o introducida por efecto de intervenciones de Ingeniería Naturalística (IN), debe ser adecuadamente valorada teniendo en cuenta la complejidad de los fenómenos y sus mutuas interacciones con otros elementos, imponiendo un enfoque de tipo multidisciplinar finalizado a una correcta interpretación de la realidad física en examen (Preti y Bacci, 2004). La interacción de mayor importancia entre vegetación y cauce que la contiene es la que se refiere a la resistencia al flujo, y su estudio debe ser afrontado por separado en el caso de vegetación sumergida (calados hídricos superiores a la altura de la vegetación erecta) y no sumergida (vegetación en el cauce con calado bajo o vegetación en las orillas o bancos en los cauces). En la Fig. 5.1 (Región Lazio, 2002) se explicita un diagrama con las principales interacciones cauce-vegetación y sus mutuos enlaces.

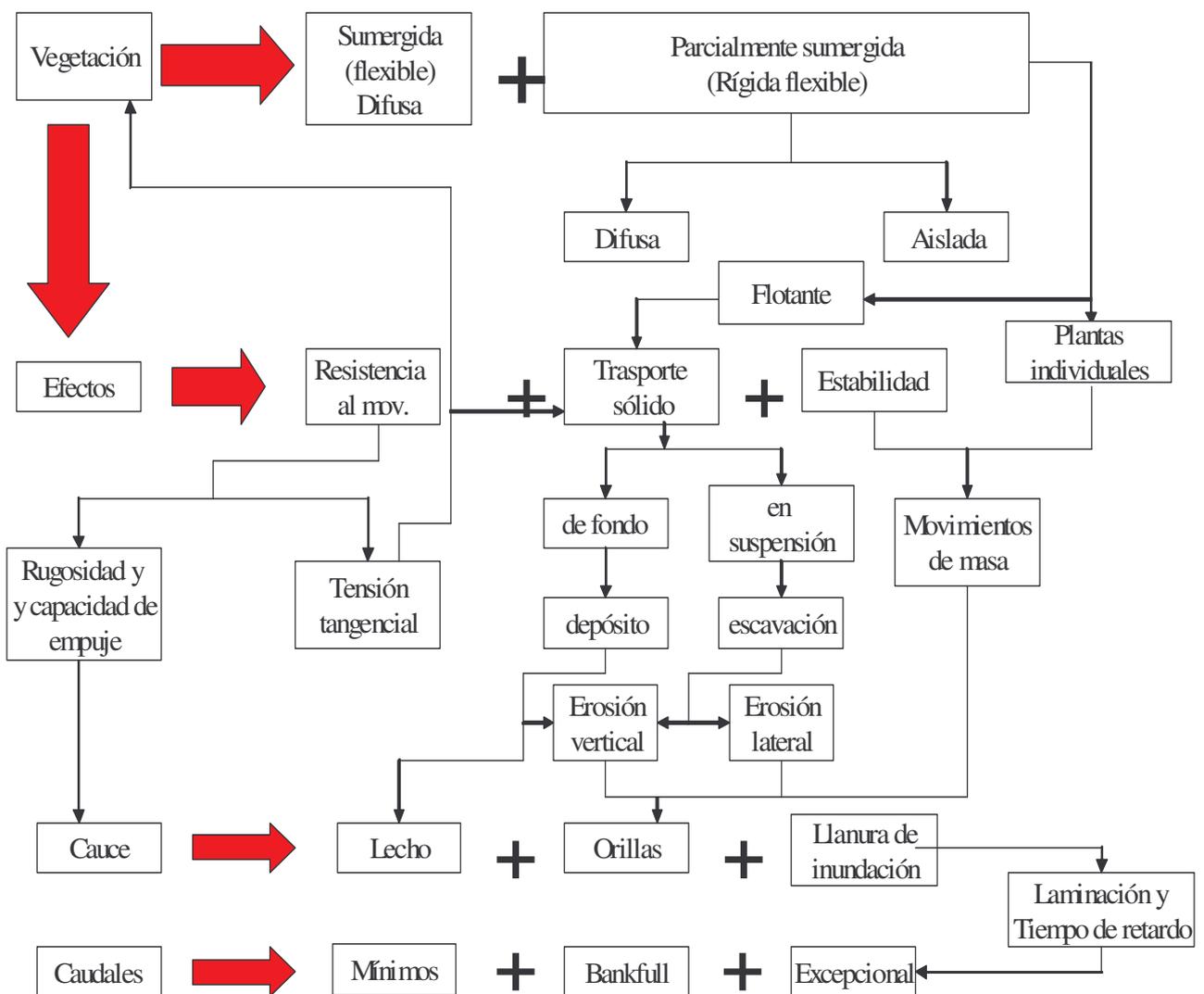


Figura 5.1 - Interacciones cauce – vegetación (Fuente: Región Lazio, 2002).

La resistencia al flujo de una corriente debida a la vegetación que recubre un cauce, depende básicamente de la acción ejercitada por la misma corriente y de la resistencia a flexión de las hojas y fustos que tienden a aumentar en el tiempo con el envejecimiento de las porciones vegetales. Aumentando la resistencia al flujo, la vegetación provoca un aumento del calado de la corriente, y esto contribuye a aumentar el peligro de desbordamiento. Además, el aumento de calado puede llevar a valores y distribuciones de velocidad tales que pueden determinar la extirpación de la misma vegetación, con el consiguiente riesgo de desequilibrios localizados, erosiones y oclusiones de secciones críticas aguas abajo. En la Fig. 5.2 se resumen esquemáticamente los efectos que la vegetación en los cauces y en sus márgenes aporta a la corriente (Región Toscana, 2000). El efecto “negativo” de la vegetación sobre los niveles del agua se ha cuantificado particularmente significativo en el caso de cursos de agua estrechos (anchura del cauce $b < 10$ veces la altura crítica h), como se ha experimentado en el caso de estudio relativo al río Marta (Civitarese, 2000).

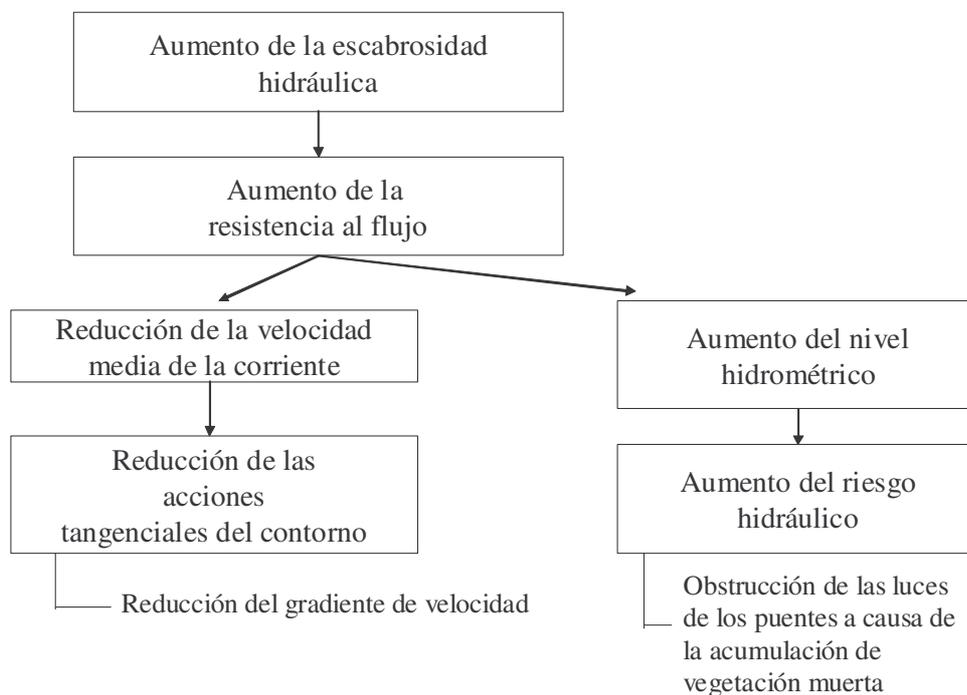


Figura 5.2 - Efectos de la vegetación sobre la corriente (Fuente: Región Toscana, 2001).

5.4 INTRODUCCIÓN DE VEGETACIÓN EN EL CAUCE

En Italia, según una ley de 1993, por lo que concierne las obras hidráulicas en los cauces se prevé, entre las actividades, "la remoción en las orillas y en los cauces activos de los arbolados que obstaculan el regular flujo de las avenidas con recurrencia próxima de treinta años". En este sentido, la misma ley recita: "le remoción interesará los árboles que influyen negativamente en el flujo, y los árboles perjudiciales para la defensa y conservación de las orillas, pero salvaguardando, donde posible, los consorcios vegetales que colonizan de modo permanente los hábitat riparios y las zonas de depósito aluvionales adyacentes". Al mismo tiempo, se invita a una renaturalización de las orillas, entendida como protección y estabilización de las mismas con cenosis arbustivas flexibles espontáneas y autóctonas. El conocimiento de los valores de los caudales punta correspondientes a avenida de asignada recurrencia (caudal de proyecto) y de las consecuentes solicitaciones inducidas por la corriente, resulta por tanto fundamental, además que en la elección y en el dimensionamiento del tipo de intervención de ordenación hidráulica, también en la elección de las técnicas de Ingeniería Naturalística más oportunas y en la elección de las especies vegetales a adoptar.

Resumiendo, la presencia de la vegetación en cauces naturales proporciona ventajas que pueden ser aprovechadas, aunque con algunas limitaciones, incluso en el uso de técnicas de Ingeniería Naturalística en la ordenación y manejo de los cauces:

- La presencia de vegetación es fundamental para la calidad de los ecosistemas fluviales y constituye un elemento esencial en las intervenciones de recalificación fluviales;
- La vegetación favorece la resistencia mecánica del suelo y la defensa de la erosión, propiedades que son explotadas en particular en las obras de Ingeniería Naturalística;
- Para valorar los efectos y programar las intervenciones de Ingeniería Naturalística es necesario analizar y monitorear las variables hidrológicas e hidráulicas que afectan el conjunto tramo-cuenca;
- En el caso de cauces con secciones transversales estrechas, es importante profundizar el análisis de la resistencia al flujo ofrecida por varios tipos de intervenciones en las orillas;

- El aumento del calado puede llevar a valores y distribuciones de velocidad tales de extirpar la vegetación, con riesgo de erosión de la orilla;
- La resistencia a la tensión tangencial de la corriente varía en las diferentes fases vegetativas de las especies arbustivas y en base a las particulares condiciones ecológicas del sitio;
- La presencia de plantas aisladas constituye un punto de discontinuidad para el flujo, creando problemas de erosión en el cauce más bien que constituir una protección al mismo;
- El eventual arrastre y desgarramiento de las plantas puede crear oclusiones en secciones hidráulicas aguas abajo, especialmente en correspondencia de obras hidráulicas;
- La vegetación en el cauce favorece la sedimentación de los sedimentos transportados por la corriente;
- Una indiscriminada y generalizada acción dirigida a aumentar la capacidad de flujo llevaría a un acortamiento de los tiempos de concentración de las avenidas, con consecuencia aún más graves de aquellas derivadas de los desbordamientos o erosiones localizadas.

5.5 LA LEGISLACIÓN ITALIANA EN TEMA DE GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS Y OBRAS HIDRÁULICAS

La descripción de la normativa que ha regulado en el pasado la gestión de los cauces y del territorio circunstante tiene como finalidad la comprensión de cómo ha evolucionado la visión general del manejo de los hidrosistemas. Un acercamiento siempre más cuidadoso a la salvaguardia del ambiente expresa la necesidad de ver el río, no como una entidad estática en las escalas espacial y temporal, si no como parte de una unidad más grande y en una dinámica de largos tiempos, llevando de este modo a la creación de nuevas tipologías de intervención que respetan esta exigencia dinámica.

La normativa italiana que se refiere a los temas de recursos hídricos y obras hidráulicas, funda las propias raíces en el “Testo Único” n. 523 sobre las obras hidráulicas, aprobado con

R.D. el 25 de Julio 1904 y hoy aún vigente. Allí aparece clara y unívoca la competencia de los Prefectos acerca de las disposiciones concernientes a las obras hidráulicas. A la autoridad prefecticia (que es la representación del gobierno a escala provincial) fue demandada la competencia en la definición de las áreas demaniales de los cauces, como bien la aprobación y validación de todos los proyectos concernientes a la construcción y modificación de todas las obras que pueden, directamente o indirectamente, influir sobre el régimen de los mismos cauces.

Las atribuciones de estas competencias a los prefectos, subraya la intención del legislador de considerar la seguridad pública el primer criterio de valoración de los proyectos de obras hidráulicas. En su Art. 96, el “Testo Único” del 1904 dispone que, con respecto de la presencia de vegetación en el cauce, se haga siempre referencia al concepto de “mantenimiento de la sección hidráulica”. Este artículo define las actividades prohibidas en los cauces, entre las cuales se elencan las siguientes:

- “plantaciones en los cauces de los ríos, torrentes, riberas y canales que reduzcan la sección necesaria al flujo”;
- “desgarramiento de las cepas de los árboles que sostienen las orillas de los ríos y de los torrentes en una distancia inferior a nueve metros desde el canal de aguas ordinarias”;
- “plantaciones de cualquier tipo de árboles y arbustos sobre y en proximidad de márgenes y diques de ríos, torrentes y canales navegables”;
- “plantaciones de árboles y movimiento de suelo a distancia inferior de 4 metros desde los diques; excavación de gravas o suelo a distancia inferior de 10 metros desde los diques”;
- “cualquier obra, infraestructura o actividad que pueda alterar el estado, la forma, las dimensiones, la resistencia o la funcionalidad de los diques marginales al cauce”.

Otras actividades o actos prohibidos interesan, el pastoreo y la permanencia del ganado, la abertura de fosas, las alteraciones de las riberas de defensa y, más en general, cualquier intervención en el cauce o en las orillas de los ríos que pueda dañar a la navegación. Las consideraciones técnicas en relación a la presencia de vegetación en el cauce y en los diques de los ríos tenían básicamente fundamento en la posible disminución de la sección hidráulica

necesaria para el flujo. Esta norma no deja inicialmente entonces alguna posibilidad de plantación de arbustos en los ríos y en proximidad de los mismos. Al R.D. 523 del 1904 sigue, a distancia de un 30 años, el R.D. 11/12/1933, n. 1775, que recoge en un texto único las leyes del agua, y reglamenta las concesiones al uso de las aguas, sea superficiales que subterráneas, por parte de privados y consorcios de privados. En este contexto el interés público a la explotación de las aguas, y la consecuente necesidad de someter el patrimonio hídrico a un control público, determina una expansión de las aguas denominadas públicas y un correspondiente redimensionamiento del derecho de la propiedad privada.

5.5.1 LA TRANSFERENCIA DE COMPETENCIAS A LAS AUTORIDADES REGIONALES EN MATERIA DE RECURSOS HÍDRICOS

En los años 50 del '900, varias leyes han financiado obras hidráulicas y de ordenación en los ríos principales de interés nacional, realizadas por parte de los Ministerios de Obras Públicas.

A partir de los años 70 ha paralelamente empezado un proceso de transferencia del Estado Central a las Autoridades regionales con estatuto ordinario (20 en Italia) de las competencias en las materias indicadas en el Artículo 117 de la Constitución. En razón de las leyes n. 281 del 1970 y n. 382 del 1975, y de los decretos del Presidente de la República n 15 del 1972 y n. 616 del 1977, han pasado a las regiones las competencias relativas a las obras hidráulicas de cuarta y quinta categoría, pertenecientes a las cuencas nacionales, y a las obras de segunda y de tercera categoría, que caen en el ámbito de las cuencas regionales.

Permanece la competencia de los órganos centrales para:

- obras hidráulicas de primera categoría independientemente de la cuenca de pertenencia y a las obras de segunda y de tercera categoría situadas en las cuencas definidas interregionales (Art. 89 y 91 del D.P.R 24 julio 1977, n. 616);
- tutela, disciplina y utilización de las aguas públicas;
- actualizaciones y modificaciones de los planos reguladores de los acueductos;
- ordenación hidrológica y conservación del suelo.

Vienen también traspasadas a las regiones con estatuto ordinario las oficinas provinciales de ingenieros civiles (“Genio Civile”), que anteriormente pertenecían directamente al Ministerio de Obras Públicas. En actuaciones a las prescripciones mencionadas, y sobretodo del D.P.R. n. 616 del 1977, viene promulgada en 1977 otra ley que introduce el concepto de intervención a escala de cuenca hidrográfica, y obliga a la delimitación de las cuencas de carácter interregional. Poco después, la ley n. 298 del 1980 confirma esta dirección financiando proyectos en materia de obras hidráulicas de competencia regional.

5.5.2 LA NUEVA LEY SOBRE LA DEFENSA DEL SUELO (N. 183 DEL 1989)

Posteriormente a las disposiciones normativas inherentes al traspaso de algunas competencias a las autoridades regionales, viene promulgada la ley n. 183 del 18 mayo 1989, con la intención de reajustar funcionalmente la organización de la defensa del suelo y de la tutela del agua. La ley 183 instituye y crea las Autoridades de Cuenca (*Autorità di Bacino*) con competencia completa en las cuencas de interés nacional. Las Autoridades de Cuencas son organismos mixtos constituidos por organismos expresión del Gobierno, de servicios técnicos nacionales y autoridades regionales, que operan con el objetivo de la tutela de la integridad física del territorio, que es la condición última de cada hipótesis de transformación (física o funcional) del mismo territorio. El principal instrumento de ordenación a disposición de las Autoridades de Cuenca son los *Planos de Cuenca Hidrográfica*. Las normas contenidas en la ley 183/89 referidas a la defensa del suelo y del agua, y al uso racional de estos recursos, constituyen (Art. 1) *normas fundamentales de reforma económico-social de la República además de principios fundamentales así como definidos por el Art. 117 de la Constitución* y son, por eso, directiva y límite a la producción legislativa regional.

La grandes expectativas sobre la ley 183/1989 como principal instrumento de defensa del suelo y tutela ambiental en Italia han quedado en parte decepcionadas por la difícil aplicación de una norma en la cual el buen éxito de la actividad de planificación y de gestión está subordinado al instaurarse de estrechas formas de colaboración entre varias instituciones tradicionalmente dedicadas a la actividad de planificación y los nuevos sujetos introducidos por la 183/1989. Algunas dificultades aplicativas se refieren a la introducción de la cuenca hidrográfica como unidad de base de la planificación. Esto ha llevado algunas complicaciones

por la interacción entre Planos de Cuenca Hidrográfica y otros planos territoriales de planificación a nivel regional y de ayuntamientos. De todo modo, algunas controversias entre el estado central y las regiones han sido clarificadas con una ley en 1998 (n. 1125) que, en tema de competencias en obras hidráulicas, clarifica que las regiones tienen poder de:

- Proyección, realización y gestión de obras hidráulicas de cualquier naturaleza;
- Concesiones de permisos de extracción de gravas y arenas en los ríos;
- Gestión del patrimonio hídrico (demanio).

Para las obras más relevantes que interesan un territorio súper-regional, los organismos del estado central y de las regiones interesadas son invitados a estipular acuerdos de programa para la definición de los proyectos y de la modalidades gestionales.

5.5.3 LEY N. 37 DE 1994

Con la ley n. 37 del 5 enero 1994 (Normas para la tutela ambiental de las áreas demaniales de los ríos, torrentes, lagos y de las otras aguas públicas), se introduce una norma de salvaguardia según la cual hasta la aprobación de los Planos de Cuenca Hidrográfica, las intervenciones de corrección de ríos y de los torrentes, de saneamiento (“bonifica”) y otras intervenciones que incidan sobre el régimen de las aguas públicas, comprendidas aquellas de extracción de gravas y arena de los cauces del patrimonio fluvial y lacustre, deben ser realizadas con una preventiva evaluación de impacto ambiental. Esta evaluación de impacto ambiental es redactada por la Administración competente, que subordina la entrega de las autorizaciones y de las concesiones, al respecto del régimen de las aguas, de la tutela del equilibrio geostático y geomorfológico de los terrenos, y a la tutela de los aspectos naturalísticos y ambientales. Para acompañar las recientes disposiciones, deben ser necesariamente introducidas nuevas evaluaciones en relación a la delimitación del cauce. En este sentido para la individuación del cauce de un curso de agua se ha introducido un concepto de área de pertenencia fluvial, entendida como la porción de territorio estrechamente conectada a la presencia del río, funcional a su actividad biológica y a la evolución dinámica del sistema fluvial.

5.5.4 LA NORMATIVA SOBRE RESTRICCIONES PAISAJISTAS Y AMBIENTALES.

La legislación sobre los recursos hídricos y las obras hidráulicas ha sido expuesta, en los párrafos precedentes, primariamente desde el punto de vista de la evolución histórica de la disciplina jurídica, con el fin de perfilar la tendencia evolutiva de un sistema normativo rígidamente ligado a objetivos de seguridad hidráulica hasta la mitad de los años '80, y luego siempre más abierto a problemáticas de carácter ecológico-ambientales. Este último es el concepto inspirador de la ley n. 431 del 1985, comúnmente conocida como *Ley Galasso*, que constituye la primera normativa orgánica para la defensa del territorio italiano en sus aspectos naturalísticos más relevantes. La ley 431/1985 substituye una ley del 1939 (n. 1497) que por primera vez introdujo un vínculo paisajista, creado para evitar deformaciones del paisaje y deturpaciones ambientales. La ley Galasso (431/1985) somete a restricción o "vínculo" ambiental, entre otros ambientes con valor ecológico-ambiental, todos los ríos, torrentes y lagos, además de las relativas márgenes hasta una anchura de 150 metros en cada una de ellas. Aunque esta ley haya tenido en los últimos años problemas de aplicabilidad debidos a conflictualidades en las administraciones implicadas en los procedimientos de deroga, la introducción del concepto de "vínculo" o restricción ambiental ha abierto la vía a una visión más completa del concepto de *ambiente* o de *hábitat* natural con ineluctable referencia a una concepción ecosistémica del paisaje. En el caso específico de la tutela del hidrosistema, esta está garantizada por la imposición automática del vínculo (restricción) ambiental. Dado que las áreas de ribera son ocupadas por formaciones arbóreas, arbustivas y herbáceas en equilibrio dinámico evolutivo entre ellos, y dado que el corte a raso de estas formaciones perjudicaría de un punto de vista paisajístico-estético-ambiental el valor ecológico de estas biocenosis, el corte a raso de tales formaciones está estrictamente sujeto a autorizaciones. Los "vínculos" interesan el curso de agua en sí mismo y sus márgenes hasta una franja de 150 metros. Aunque sigue siendo problemática la definición del límite desde el cual parten los 150 m de anchura de las márgenes del río, una importante sentencia del 1992 individua este límite en la línea de la avenida ordinaria. Parece oportuno en esta sede notar como, entonces, todas las intervenciones en las áreas de competencia fluvial, sean estas también de manutención y ordenación de la cobertura vegetal, están sujetas a la obtención de una autorización en delega de las leyes de tutela paisajísticas-ambientales.

5.5.5 VEGETACIÓN EN LOS CAUCES Y DIRECTIVAS LEGISLATIVAS

La reseña normativa presentada ilustra como, a partir del R.D. 523/1904 hasta llegar a nuestros días (ley 37/1994), manteniendo como objetivo prioritario la salvaguardia de la vida humana y el uso del agua para el consumo humano, la legislación en materia de obras hidráulicas y de recursos hidráulicos, ha ido persiguiendo una finalidad de tutela ambiental. Por tanto, la evolución normativa puede ser dividida en tres fases: la primera fase ha visto prevalecer la exigencia de tutelar el territorio y la población de los posibles daños causados por las aguas; la segunda evidencia el afirmarse del interés a la explotación de los recursos hídricos; la tercera está dominada por la necesidad de predisponer una serie de medidas aptas a la salvaguardia cualitativa y cuantitativa de los recursos hídricos. En esta última y más reciente fase, las normativas se dirigen hacia la *ordenación, conservación y recuperación del suelo en las cuencas hidrográficas, con intervenciones hidrogeológicas, hidráulicas, hidráulico-forestales, hidráulico agrarias, silvo-pastorales, de forestación y de "bonifica" (saneamiento) incluso a través de procesos de recupero naturalístico, botánico y faunístico* (ley 183/1989, Artículo 3). Este impulso es posteriormente desarrollado en las disposiciones, aún más recientes, que contienen precisas directivas para un uso más racional de los recursos hídricos, para una preservación del mínimo flujo vital (caudal ecológico), para la realización de intervenciones en cauce compatibles con el equilibrio del ecosistema con particular referencia a la tutela del equilibrio geomorfológico de las áreas fluviales y a la tutela de los aspectos naturalísticos y ambientales.

En lo que se refiere más estrictamente a la presencia de vegetación en el interior de los cauces, considerando que en los últimos tiempos las técnicas de intervención sugieren el uso combinado de materiales inertes y vivos (Ingeniería Naturalística) por conveniencia ambiental, parece útil verificar las problemáticas y las reales posibilidades operativas, ya que solo con una interpretación mirada de las leyes es posible invitar los técnicos al uso más oportuno de estas nuevas intervenciones, en línea con las normativas y las posibilidades que estas permiten. A continuación se ilustrarán entonces las principales normas nacionales que pueden significativamente interesar la problemática tratada, y que pueden incentivar la aplicación de criterios y técnicas de recalificación fluvial. Un primer paso hacia la posibilidad de introducir vegetación arbórea en los cauces llega con la ley n 381 del 01/03/1928. Esta ley, teniendo más en cuenta un objetivo de explotación de recursos naturales que de tutela ambiental, contiene

disposiciones para facilitar y difundir la cultivación de álamos y de otras plantas arbóreas. En 1936 otra ley (la n. 1338), que mira a expandir la plantaciones de álamos, atribuye a una especial Comisión el encargo de determinar las porciones de competencias hidráulicas de aguas públicas que pueden ser destinadas al cultivo de álamos o de otras especies arbóreas y de evaluar los planos silviculturales presentados junto a las peticiones de concesión de plantación. A esta Comisión se atribuye también la facultad de derogar las disposiciones que imponen el respeto de una cierta distancia para la plantación entre las orillas de los cursos de agua. Esta ley resulta particularmente importante hoy en día por la justificación de intervenciones con las técnicas de Ingeniería Naturalística en los ríos.

5.6 CRITERIOS INNOVATIVOS PARA LA PROYECTACIÓN Y LA EJECUCIÓN DE LAS INTERVENCIONES EN EL CAUCE

Las disposiciones en materia de intervenciones de mantenimiento hidráulica y forestal son sintetizadas en el D.P.R. 14 de abril 1993, que proporciona normas de coordinación a las leyes regionales en temas de *criterios y modalidades para la redacción de los programas de mantenimiento hidráulica y forestal*. Con particular referencia a las tipologías de las intervenciones de mantenimiento en los cursos de agua, la norma prevé por un lado la *eliminación de la vegetación arborea que causa obstáculo al regular flujo de las aguas en las orillas de los cauces interesados por avenidas con recurrencia de treinta años*, y por otro la *conservación y valoración de los consorcios vegetales que colonizan de modo permanente los habitats riparios y las zonas de depósito aluvionales*. La ley de 1993 obliga además a la naturalización de las orillas de los ríos con consorcios vegetales espontáneos flexibles y a la restauración de los ecosistemas de ribera, comprendiendo la eventual plantación de especies autóctonas.

La responsabilidad de la adaptación de estos nuevos criterios de ejecución de las intervenciones de mantenimiento de los cauces es demandada a las Autoridades de Cuenca Hidrográfica, que singularmente han luego redactado planos de intervenciones que siguen estos criterios:

- Facilitar los flujos en los cauces que contienen las avenidas con recurrencia de 30 años;

- Restablecer la funcionalidad de las obras hidráulicas;
- Recuperar las condiciones de naturalidad de los ecosistemas fluviales.

Algunos de los artículos de la circular de una de la más importantes Autoridad de Cuenca Hidrográfica del área Nord-Este de Italia revela la particular atención reservada a la tutela del hidro-biosistema:

- El aspecto condicionante de las intervenciones deberá ser la conservación de las características de naturalidad de los cauces, de la movilidad del lecho y el respeto de las áreas de expansión natural y las zonas húmedas;
- El proyecto de manutención de los cauces deberá considerar el mantenimiento de las peculiaridades propias del ecosistema, utilizando a nivel ejecutivo las técnicas particulares de la Ingeniería Naturalística, teniendo finalidad ecológica y estético-paisajística, además que técnico-funcional.

Tales técnicas por tanto, además de corresponder en primer lugar a la exigencia de salvaguardia hidráulica con función contra la erosión y de consolidación de las orillas, tenderán al restablecimiento de los ecosistemas naturales, y no simplemente a un efecto de maquillaje con fines estético-paisajístico. En este sentido como materiales de construcción deberán ser empleados, además de los materiales tradicionales si compatibles con el contexto ambiental, plantas vivas y material inerte local. En este contexto van consideradas con primario interés aquellas intervenciones que aportan efectos beneficiosos al ecosistema fluvial, sea en relación a la capacidad de auto depuración del hidrosistema, sea con fines de estabilización de las orillas.

En lo que concierne las intervenciones en orillas y márgenes de los cauces de llanura con vegetación natural, la dirección es igualmente la de restablecer la funcionalidad de las obras hidráulicas y de las secciones, usando técnicas que armonicen las exigencias de seguridad hidráulica con la tutela de los aspectos ecológicos y paisajísticos ligados a los ámbitos fluviales. En esta óptica, asumen particular importancia las zonas de natural expansión de los cursos de agua (*golena*) en el interior de los muros o márgenes de protección, para los cuales se evidencia que las especies arbóreas no reducen en modo sustancial la capacidad de embalse mientras que, disminuyendo la velocidad de la corriente, favorecen la defensa de las orillas de la erosión y la recarga de los acuíferos subterráneos. En el tratamiento de la vegetación

arbórea en el interior de los cauces deberán entonces ser evitadas inútiles deforestaciones y tener cuidado en eliminar solo las plantas muertas, enfermas, peligrosas, débilmente enraizadas o viejas, favoreciendo la instauración de aquella vegetación que tenga características de flexibilidad, de resistencia a las solicitaciones de la corriente y a las temporáneas inundaciones, como por ejemplo los álamos y los sauces, generalmente utilizados en las defensas de taludes. Será también necesario prever un tratamiento periódico de la vegetación en modo de mantener la fitocenosis a un perenne estadio juvenil, con fustos flexibles y de pequeño diámetro, evitando corte a raso y la inserción de especies exóticas.

En conclusión, aunque no sea muy fácil orientar las intervenciones de gestión de los ecosistemas fluviales en un contexto legislativo a veces contradictorio, las modernas disposiciones normativas evolucionan siempre más hacia un consciente respeto del ambiente, aún no olvidando el respeto de los principios fundamentales de las normas de Policía de las Aguas Públicas (n. 523/1904).

5.7 LA LEGISLACIÓN SOBRE EL MANEJO DE LA VEGETACIÓN EN EL CAUCE, EN ITALIA Y EN LAS REGIONES

Al cuadro normativo anteriormente expuesto se incorpora una ley de 1998, que reparte entre las regiones (20 en Italia) y las provincias autónomas (dos en Italia: Trento y Bolzano) los bienes y los recursos financieros, humanos, instrumentales y organizativos para el ejercicio de las funciones y de los trabajos en materia de patrimonio nacional hídrico. A la luz de estas autonomías locales, parece oportuno ilustrar algunos ejemplos de gestión de vegetación en los cauces, en particular los de dos regiones del área Nord-Este de Italia: Veneto y Trentino Alto-Adige.

5.7.1 REGIÓN DEL VENETO

En Veneto las competencias relativas a la gestión fluvial están repartidas entre órganos diferentes. Las obras de ordenación hidráulicas son de competencia de las oficinas provinciales de Ingenieros Civiles (*Genio Civile*) y de los *Servicios Forestales*, estos últimos en particular operan en zonas de montaña. En lo que concierne el ámbito más de llanura, las competencias están divididas entre los Ingenieros Civiles, los *Servicios Forestales* y los Consorcios de Bonifica. Al fin de evitar sobreposición de competencias y coordinar los

esfuerzos, la Región Veneto impone una subdivisión entre redes hidrográficas principales, de competencia de los Ingenieros Civiles, y secundarias, de competencia de los Consorcios de Bonifica. Por lo que concierne más estrictamente al tema del tratamiento de la vegetación en los cauces, la Región del Veneto ha hecho suyas las normas del D.P.R. 14 de abril 1993, con una deliberación regional (n. 4003 de 1994). En ésta se confirma como las intervenciones en los cauces, aunque sean dirigidas a garantizar una sección hidráulica para la esorrentía de avenidas de proyecto, nunca deben comprometer las funciones biológicas del río y de las comunidades vegetales y faunísticas ripariales. Excepciones a estas directivas pueden ser aceptadas solo en cursos de agua con particulares problemas de seguridad hidráulica que pasan por centros urbanos o en proximidad de importantes infraestructuras antrópicas.

Considerando el cauce, la deliberación invita a eliminar, dentro de la sección del cauce interesada por avenidas con recurrencia de treinta años, la vegetación arbórea y arbustiva que se considera peligrosa al flujo regular de las descargas líquidas. Estas operaciones tienen que ser realizadas posiblemente en el periodo otoño-invierno. De todos modos, aunque en el interior del cauce activo con recurrencia de treinta años, tienen que ser consideradas las peculiaridades naturales-ambientales, teniendo en cuenta la oportunidad de cortes selectivos y parciales al fin de mantener la biodiversidad vegetal y animal y de mantener los hábitat para la vida y la reproducción de las aves.

La vegetación riparial no están sujeta a una verdadera ordenación silvicultural. Normalmente las operaciones de manutención y tratamiento son realizadas previa autorización concedida por parte del Genio Civile, que debe pedir y obtener una evaluación positiva de los Servicio Forestales, que deben cuantificar los valores ecológicos del sitio y el valor de las plantas (Fig. 5.3.). Esta autorización al tratamiento y uso del material vegetal en el cauce puede ser pedida por parte de privados o por parte de entidad públicas como Ayuntamientos o Agrupaciones de Ayuntamientos (*Comunità Montane*).

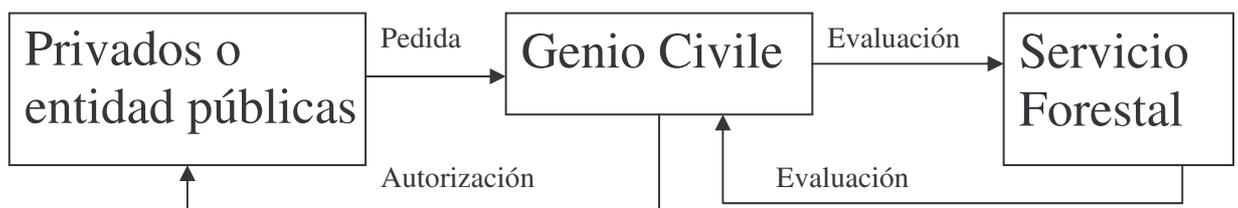


Figura 5.3 - Procedimiento para la solicitud de cortes de vegetación en los cauces.

El Servicio Forestal, independientemente de las peticiones de corte de vegetación en los cauces, efectúa una programación anual y a largo plazo de cortas de las plantas para las zonas de su propia competencia. Cuando el Servicio Forestal concede una autorización de corte, tiene en cuenta el aspecto ecológico, ambiental y paisajístico, pero también el valor patrimonial del material a cortar. La madera producida con el corte en una área que en todo caso es de propiedad pública demanial tiene un valor, pero al mismo tiempo tiene un cierto costo de corte y recogida que depende de la accesibilidad del sitio y de las condiciones del mismo. Junto al valor económico de la vegetación en el cauce deben ser entonces evaluados los costos de corte y transporte del material. El sujeto (singulares ciudadanos, empresa privada, Ayuntamiento o Agrupaciones de Ayuntamientos) que entiende ocuparse del corte y extracción del material vegetal debe entonces pagar una cota, valorada caso por caso por los Servicios Forestales competentes, y que es recibida por la Hacienda Pública Regional. En el Capítulo 1.9 se reportarán algunos ejemplos de cálculo de estos valores.

5.7.2 REGIÓN DEL TARENTINO ALTO-ADIGE

La situación de la Región del Trentino Alto-Adige es diferente respecto a la de la Región del Veneto. El Trentino Alto-Adige es una región autónoma, y las dos provincias que la componen (Trento y Bolzano) tienen también una cierta autonomía. Los organismos involucrados en la temática tratada y los procedimientos y prácticas de gestión de vegetación en los cauces son diferentes, y obligan entonces a una descripción separada. Merece ser subrayado que los territorios de las dos provincias son casi totalmente montañosos, y que entonces la descripción de sus experiencias en organización y prácticas de gestión de vegetación en los cauces de pequeña y media dimensión es muy útil.

5.7.2.1 *La Provincia Autónoma de Trento*

La gestión de los cursos de agua en la Provincia Autónoma de Trento se remonta, en lo que respecta a la subdivisión de las competencias entre diferentes órganos legislativos y operativos, al periodo del Imperio Austro-Húngaro (hasta 1918). Las competencias están subdivididas entre el *Servicio de Obras Hidráulicas*, cuya competencia es la gestión de los cursos de agua a carácter fluvial y de los principales lagos de propiedad pública estatal y el

Servicio de Sistemación Montana, que se ocupa de todos los demás cursos de agua menores y lagos pertenecientes al patrimonio hídrico provincial. El patrimonio hídrico provincial comprende casi todos los principales cursos de agua de la Provincia de Trento que fueron registrados en el 1942 por el Servicio de Aguas Públicas. Los restantes cursos de agua permanecieron en competencia de los propietarios de los terrenos que atraviesan los cursos de agua y su gestión debe basarse sobre cuanto especificado en el Código Civil (Art. 915, 916, 917, y 1033). Relativamente a la extracción de material inerte (gravas y arena) de los cauces, la normativa provincial en materia de aguas públicas (n. 18 del 1976) prevé la posibilidad de efectuarlas sólo si estas operaciones recaen en las operaciones de ordinaria manutención de los bienes del patrimonio hídrico público. Eso significa que las extracciones pueden ser concedidas solo y exclusivamente con el fin de asegurarse el restablecimiento de la sección útil de flujo y para garantizar la eficiencia de las obras de ordenación hidráulico-forestal, y no para finalidades exclusivamente comerciales.

En lo que concierne más estrictamente al caso del manejo y manutención de la vegetación en el cauce o en las áreas que le rodean, en los cauces que recaen bajo la gestión del *Servicio de Sistemación Montana*, este es normalmente realizado por obreros a las directa dependencia del mismo Servicio, en una economía de “administración directa”. En algunos casos se remiten los trabajos de corte y extracción de madera a agricultores locales, tramite la estipulación de un contrato, a través del cual el contratista se compromete a respetar todas las prescripciones fijadas por el Servicio, además de respetar naturalmente las normas de seguridad. Finalizados los trabajos, tras la redacción de un certificado de regular ejecución por parte de un funcionario del Servicio, al contratista será proporcionada la retribución prevista.

En los cauces fluviales mayores bajo la gestión del *Servicio de Obras Hidráulicas*, el problema ligado a una excesiva presencia de vegetación es menos importante. Cuando hace falta, dicho Servicio concede a empresas especializadas el trabajo de retirar el material vegetal. Si el valor de la madera extraída supera los costes de corta y desbosque la empresa debe pagar una contribución al Servicio. Frecuentemente, los materiales vegetales recuperados en los cauces tienen un valor comercial muy bajo y los costes de desbosque son altos por inaccesibilidad de los sitios. En estos casos, cuando un privado pide autorización de retirar cualquier planta de alto fusto de una propiedad del patrimonio nacional hídrico, normalmente la petición viene autorizada sin dar lugar a ningún pago.

5.7.2.2 *La Provincia Autónoma de Bolzano*

En la Provincia Autónoma de Bolzano, diferentemente que en la Provincia de Trento, la gestión de la vegetación en los cauces es competencia de una sola entidad: el *Servicio de Obras Hidráulicas* de la Provincia. Esta entidad, en efecto, se ocupa de todos los aspectos de ordenación, gestión y manutención de cursos de agua que recaen en el territorio provincial, ocupándose entonces también de la manutención, cortas y reutilizo de las plantas en los cauces. Los niveles de trabajo son principalmente:

- *La evaluación de la potencial intensidad de transporte de detrito vegetal en los ríos;*
- *Modelación de eventuales sistemas de gestión de los ríos y estudio de las obras adecuadas a la atenuación de los riesgos.* Resulta esencial diversificar las problemáticas de los torrentes de montaña donde el detrito vegetal primariamente se acumula (y donde se ha revelado eficaz la construcción de redes y diques abiertos de captura), del caso de grandes ríos, como el Fiume Adige, caracterizado más por el problema del transporte de la madera por flotación, caso en el cual resulta difícil cuantificar el caudal de material y la dinámica que caracteriza el fenómeno. Desde el punto de vista del dimensionamiento, se utiliza un franco de seguridad para permitir el pasaje al material flotante;
- *Gestión de la vegetación presente en el cauce.* La Provincia Autónoma de Bolzano tiene una larga experiencia de control y manutención de vegetación en los cauces, como será ilustrado a continuación.

La necesidad y la posibilidad de evaluar todos estos aspectos nace de la concentración de la gestión en un único Servicio que opera en una Provincia con un territorio no demasiado extenso pero caracterizado totalmente por la presencia de relieves montanos. A diferencia de otras provincias, no hay una separación en la gestión y en la repartición de las competencias entre las diferentes entidades, sino que todo está coordinado por el Servicio de Obras Hidráulicas. Esta estructura comprende figuras interdisciplinarias y complementarias (biólogos, ingenieros, forestales...) que cooperan en las actividades de diseño de un proyecto, gestión, manutención e investigación, consintiendo una visión integrada del problema a afrontar y permiten el estudio de soluciones adecuadas y específicas para cada problema. El territorio

está subdividido en cuatro zonas (norte, sur, este y oeste) que tienen una total autonomía; de esta manera quien actúe será responsable de las consecuencias causadas por la intervención efectuada. Una organización de este tipo garantiza, seguramente, una unidad de gestión y un mejor uso de los recursos dado que el que decide es cargado de las responsabilidades de la elección de una determinada alternativa. Además, existe un grupo de trabajo que se ocupa simplemente de la investigación y búsqueda de nuevos recursos para poder efectuar constantemente innovaciones en la metodología y en la gestión. Esta gestión claramente conlleva también desventajas por el hecho que es una única entidad quien administra y realiza, en consecuencia puede ser visto como menos democrático y puede traducirse en una escasa participación de los ayuntamientos, los cuales pueden hacer una petición de cortas en la vegetación, pero no pueden efectuar ningún tipo de trabajo en primera persona.

Otra importante característica de la gestión de los recursos hídricos en la Provincia de Bolzano es la importante y constante participación del ciudadano, que siempre está al corriente de los proyectos y es estimulado en expresar su opinión respecto a las intervenciones realizadas. Una mayor participación del ciudadano resulta aún más fundamental cuando él es llamado a desarrollar la visión del “riesgo residuo”. Después de la guerra y a continuación de los eventos catastróficos verificados hasta el final de 1900, la principal idea perseguida por los servicios de gestión de recursos y seguridad pública era aquella de la *seguridad total*. Hoy en día se está dando más peso a la concepción del *riesgo residuo*, volviendo así a una naturalidad en el enfoque de las intervenciones a efectuar. Esta nueva visión nace del conocimiento que a algunos fenómenos naturales no hay manera de impedir completamente el riesgo. Esto es debido a la gran presencia de comunidades y obras humanas en áreas por sí mismas sujetas a peligros naturales. La solución más adecuada parece ser la de buscar la seguridad total solo en algunas zonas (las más habitadas), dejando en las demás un margen de daños aceptables. Si por ejemplo anteriormente un derrumbe era visto como elemento de riesgo a ser totalmente eliminado, hoy se ve en este fenómeno también un elemento importante para la dinámica territorial, y se busca entonces de dejar a la natural evolución de los fenómenos naturales (opción de no intervención) aquellas zonas donde no hay riesgo a la vida de las personas. Este concepto de riesgo residuo tiene que ser aceptado por la población, y en este sentido la importante y diaria participación del ciudadano en los procesos decisionales es una indudable ventaja.

Relativamente a la gestión de la vegetación en los cauces, el tratamiento viene efectuado permitiendo al técnico encargado del proyecto de manutención, de experimentar nuevas técnicas. A diferencia de aquello que ocurre en otras provincias, no existe una metodología rigurosa, como por ejemplo la teoría por la cual tendrían que cortar, por causa de riesgo hidráulico, las plantas que superan los 4 cm de diámetros presentes en el cauce. En Bolzano se ha preferido un procedimiento que permite al técnico evaluar caso por caso las soluciones mejores de intervención, para saber cual ordenación es la más adecuada teniendo en cuenta todos los parámetros (ecológico, hidráulico, geológico...). Esto es posible por el hecho que la estructura es única, y que en ella hay diferentes profesionalidades que trabajan en manera multidisciplinar en el momento de la decisión de la tipología de intervención, consintiendo una visión global del problema.

Existen diferentes formas de intervención. Sobre la base informática vienen primariamente estudiados los planos de gestión plurianuales y vienen elegidas las situaciones más convenientes sobre la base de la composición de la fauna, del aspecto hidráulico, etc, tanto que en algunos casos resulta suficiente un simple aclareo de la vegetación, antes que una corta total.

De la experiencia acumulada se ha visto que puede ser útil dejar en pie los árboles y efectuar simplemente la corta de las ramas de mayores dimensiones, o bien quitar simplemente un tercio de la biomasa aérea. De esta manera se puede dejar en el cauce importantes elementos de diversidad que tienen alto el valor ecológico, pero se elimina la mayoría de los potenciales riesgos relacionados a la presencia de troncos de grandes dimensiones en los cauces. La Provincia de Bolzano está todavía experimentando diferentes soluciones de intervención, y esto es debido también a la importante diferencia de situaciones que se encuentran en el territorio y de los problemas que de otra forma ha originado lo “experimental” concretamente para un argumento de este tipo que incluye también la seguridad pública. Como ya se ha descrito en las cuatro zonas (norte, sur, este y oeste) con autonomía de intervención, gestión y manutención, se garantiza un control directo sobre el lugar y un conocimiento detallado de la situación. Existen *vigilantes hidráulicos* que controlan el territorio y avisan las autoridades competentes en caso de emergencia. Además, el Servicio tiene (como en la Provincia de Trento), sus propios equipos de obreros, expertos sea en la fase de construcción que de manutención de obras hidráulicas. Cada zona se ocupará, así, de efectuar:

- Proyectos de manutención;
- Corta de madera en los cauces (esta será luego utilizada en diferentes formas, aunque principalmente se vende a privados);
- Autorización a privados de corta y utilizo de vegetación en los cauces;
- En caso de plantas resinosas de alto fusto en los cauces es necesario consultar un técnico con competencia forestal por causa del “vinculo” (restricción) hidrogeológico;

5.8 LOS PRECIOS DE LA GESTIÓN

Como se ha dicho en los precedentes capítulos, los cauces fluviales son de propiedad pública, y son de propiedad pública también los árboles que en los cauces crecen. Cuando una administración pública concede a una empresa privada la autorización al corte y a la extracción de material vegetal del cauce de un río, ésta tiene también que evaluar el valor de la madera y de los otros materiales vegetales que las empresas tendrán que pagar. Claramente, el precio que las empresas tienen que pagar depende de la cantidad y calidad de la madera extraíble de un bosque, pero también de los costes de corta y extracción de la madera. Estos costes son altos en casos de sitios de difícil accesibilidad o con pocas vías transitables, y a veces son tan altos de superar el valor de la madera, siendo antieconómica la operación. La diferencia entre el valor de la madera cortada y puesta en orden en una carretera fácilmente accesible, y los costes de corte, extracción del bosque y transporte hasta una carretera accesible se llama *precio de transformación* (“macchiatico”, en italiano). Éste representa el precio que las empresas tienen que pagar al Servicio competente por la utilización forestal de áreas vegetadas en cauces. En casos de áreas de difícil accesibilidad o de calidad muy baja de madera, los costes son tan altos que los precios de transformación pueden ser nulos o negativos. En esta situación la empresa no tendrá que pagar nada al Servicio público competente en materia de gestión de ríos.

La evaluación de la cantidad y calidad de madera extraíble desde un bosque o de una población vegetal en los cauces es muy difícil, y quizás más difícil es la cuantificación de los costes de corte y extracción de la madera. Las variables más importantes a considerar son la metodología de corte y extracción, las tipologías de maquinarias usadas, las superficies a considerar, la anchura del cauce, la organización del trabajo y la viabilidad del sitio. A través

de ejemplos adaptados al ambiente de montaña del Norte de Italia (Andrich, 2005), se intentará definir tres casos significativamente diferentes por tipología de cauces y vegetación riparial.

1) Cauce con una área perfluvial vegetada ancha aproximadamente 10 m. Para poblaciones vegetales constituidas primariamente por sauces y otras especies rápidas colonizadoras, buena accesibilidad y grupo de trabajo de tres obreros expertos que prevén de cortar a raso y realizar montones, se puede cuantificar el precio total de los obreros y el uso de las máquinas en 10 - 20 € por quintal de material cortado y extraído del bosque.

2) Cauce de montaña con cauce activo inferior a 5 metros y vegetación perfluvial que se mezcla a la vegetación de los bosques que llegan casi al mismo cauce. En estos casos la accesibilidad al cauce es normalmente difícil. Imaginando también en este caso un equipo de tres obreros especializados y corte a raso, es posible cuantificar en 5000 € el coste unitario por metro de longitud del cauce. Esta cifra se puede reducir a la mitad en caso de vegetación normalmente sujeta a manutención. En este caso es muy difícil llegar a una cuantificación de los costes por quintal o metro cúbico de madera extraída, y parece más oportuno referirse a unidades de longitud del cauce.

3) Cauce en llanura con 20-30 m de bosque perfluvial maduro y estable en ambas márgenes. Totalmente diferente respecto a los dos casos anteriores es el que se refiere a bosques en cauces en áreas de llanura, donde las condiciones orográficas y de accesibilidad son mucho más favorables. Además, en estas áreas las poblaciones forestales son normalmente de calidad medio-alta y en buenas condiciones fitosanitarias. En este caso los precios se acercan mucho a los precios comúnmente aplicados en las utilidades forestales en áreas de bosques fuera de los cauces.

5.9 INTERVENCIONES DE MANUTENCIÓN Y DESBOSQUE DE LA VEGETACIÓN EN EL CAUCE

A las operaciones de corta y desbosque de madera desde los cauces, en el pasado no venía dada demasiada importancia por parte de las empresas, a causa del hecho que la madera obtenida es normalmente de baja calidad. Hoy en día, el mercado de la biomasa ofrece una salida muy interesante que podría permitir una revaloración general de las intervenciones de desbosque en los cauces. En un proyecto de recogida de material vegetal de los cauces hay tres

parámetros fundamentales a considerar: el tipo de vegetación presente en el cauce, la finalidad de la intervención y la accesibilidad del sitio.

5.9.1 TIPOLOGÍAS DE VEGETACIÓN EN EL CAUCE

Considerando el tipo de vegetación en un cauce, dos son las situaciones más frecuentes: presencia de una población envejecida, alta y con mucha madera explotable, o presencia de una población joven y mucho menos desarrollada. Estas dos situaciones piden una logística de trabajo completamente diferente.

Las dimensiones de las plantas condicionan aquellas de las máquinas a usar para el corte y el desbosque, y determinan la productividad de la obra (que es siempre directamente proporcional a las dimensiones de las plantas recogidas). Las plantas de grandes dimensiones pueden además proporcionar trozos de valor (aunque esto dependa de la especie y de las condiciones fitosanitarias generales). A este propósito hay que decir que los grandes chopos que se pueden encontrar en los cauces mayores son a menudo demasiado viejos, atacados por hongos o carcoma, y contienen una elevada cantidad de deshecho. De todo modo, una población vegetal bien desarrollada tiene una provisión generalmente elevada, y es más fácil que lleguen a justificarse los costes de la intervención de desbosque. También el tipo de especie mayormente presente en la formación de ribera es muy importante, porque determina la población, fijando los límites económicos de mano de obra. Una abundante presencia de especies apetecibles por los mercados tradicionales de la madera es ciertamente positivo y permite compensar, por lo menos en parte, los costes de la intervención (Spinelli, 2005).

5.9.2 TIPOS DE INTERVENCIONES

También por cuanto concierne al tipo de intervención, existen dos casos principales: cortas total a raso y cortas selectivas del plano dominante del bosque. Obviamente la segunda opción implica la existencia de una población vegetal desarrollada, con un plano dominante (plantas altas, maduras y de buena madera) y un plano dominado (plantas a bajo desarrollo y arbustos lucífugos) bien diferenciado. Las cortas a raso son las intervenciones más simples y económicas, pero merece decir que, además del aspecto económico, hay que valorar también

el impacto ecológico-ambiental-paisajístico. Es probable que sea conveniente siempre dejar un plano arbustivo, aunque sea a manchas. Remover todo el plano dominado significa gastar costosas horas de máquinas sobre un material de valor extremadamente limitado, además que remover un elemento de hábitat importantes para muchas especies faunísticas, y de reinicio de colonización vegetal en las porciones cortadas a raso.

5.9.3 ACCESIBILIDAD AL SITIO DE CORTE

Los cauces fluviales de llanura raramente presentan problemas de accesibilidad. Puestos en el interior de regiones agrícolas y cercanas a zonas fuertemente habitadas, están normalmente servidos de una densa red de carreteras y pistas. Los camiones y las máquinas empleadas en el desbosque pueden siempre llegar hasta las márgenes y hasta el interior de los cauces, donde el único obstáculo puede ser el nivel del agua. Para las excavadoras este límite se eleva, dado que el motor de una excavadora es alto al menos 1.5 m.

Para los cursos de agua más pequeños, la anchura del cauce es limitada a pocos metros y a menudo no es necesario ni entrar, pudiendo operar desde las orillas. A veces es posible introducir una excavadora dentro del cauce, para llevar fácilmente la madera sobre la orilla dado que el brazo de una excavadora llega por lo menos a 5 m.

5.9.4 LA CALIDAD DE LA MADERA EXTRAIBLE

De la manutención de los cauces pueden recogerse los siguientes tipos de surtido, listados en orden de valor decreciente:

- *Troncos*: Solo algunas especies se adaptan a la producción de troncos de calidad. En los cauces fluviales, la especie que más se adapta a esta destinación es el chopo, siempre que las plantas sean sanas y suficientemente desarrolladas. Los troncos maderables tienen normalmente un buen valor de mercado. Cuando es posible transformar parte de la planta en este tipo de surtido maderable es siempre conveniente hacerlo, a menos que el cuantitativo global sea talmente limitado de no alcanzar a llenar un pequeño medio de transporte.
- *Troncos para embalaje*: En los cauces son el chopo y el aliso las especies que pueden abastecer este tipo de destinación. El valor de mercado es más bien limitado, y es

necesario siempre evaluar la conveniencia de una transformación en conglomerado sobre la base de la diferencia de precio, ya que la transformación en conglomerado es más rápida y menos costosa que la destinación a troncos para embalaje.

- *Palos pequeños*: Se obtienen sobretudo de especies colonizadoras y a rápido crecimiento y a veces pueden también obtener un precio discreto, sobretudo en la cercanía de zonas agrícolas donde este producto es particularmente requerido. Chopo, sauce y aliso en general, no se adaptan a la producción de este surtido.
- *Leña para quemar*: Actualmente la leña para quemar tiene un precio interesante, pero entre las especies riparias la *robinia* es la única que puede abastecer una cierta cantidad, dado que las salicáceas tienen propiedades energéticas muy inferiores y son generalmente rechazadas en el mercado.
- *Descarte para trituración*: Cualquier especie puede ser adecuada, pero el producto es considerado casi un deshecho y obtiene un precio muy bajo, dado que las empresas de producción de conglomerado se están dirigiendo de modo creciente hacia los descartes leñosos de importación.
- *Ramaje*: Finalizada la operación de corte de los árboles principales, sus ramas y las partes apicales se disponen generalmente en montones, pero la entrega caótica no es infrecuente y puede causar alguna dificultad en la fase de recogida.
- *Plantas del plano dominado y plantas no comerciales*: Se trata de plantas enteras con dimensiones inferiores a la medida mínima para la comercialización. El límite dimensional para el uso comercial depende de la especie y de la forma. En efecto, estos dos parámetros determinan el tipo de destinación que es posible obtener de cada individuo, y por tanto las dimensiones mínimas necesarias. En la misma categoría pueden ser adscritas también las plantas sin uso comercial por causa de carencias en la forma de los fustos y en la calidad de la madera. Es el caso de plantas torcidas, carcomidas, podridas o pertenecientes a una especie rechazada de todas formas en el mercado.

Algunos de estos surtidos pueden tener dimensiones relevantes y ser difíciles de mover. A menudo su recogida necesita especiales precauciones y maquinaria muy pesada. Es importante subrayar que el mercado energético puede abastecer una salida muy interesante para el

material de descarte, o sea aquel material que no es posible (o no conviene) transformar en troncos, palos o leña (Spinelli, 2005). El material de descarte puede por tanto ser destinado a conglomerado u orientado a una instalación de calefacción o a una central a biomasa. De otra forma, el conglomerado, puede ser orientado a industrias que lo pueden transformar en paneles, no obstante el precio ofrecido sea en tal caso muy bajo (Spinelli, 2005).

5.9.5 LA CANTIDAD DE MADERA EXTRAIBLE

La manutención de los cauces fluviales puede generar una gran cantidad de biomasa leñosa, distribuida en gran parte entre los surtidos más pobres. Esto es porque se opera generalmente sobre formaciones de bosque muy degradadas, constituidas preferentemente de salicáceas, robinia, alisos y otras caducifolias poco valoradas. Cerca de los cauces es frecuente encontrar también choperas abandonadas, llenas de especies espontáneas y caracterizadas por el mal estado fitosanitario y de una pésima forma de las plantas. En estas condiciones, la mayor parte de la biomasa puede ser considerada de deshecho, y es posible obtener solamente una cantidad muy limitada de surtidos comerciales. La situación mejora al encontrar choperas abandonadas, donde la porción de biomasa comercial utilizable permanece inferior al 50%. Las limpiezas de fosas, terraplenes y cauces fluviales pueden producir de 30 a 180 toneladas de biomasa fresca por hectárea. Comúnmente, estos valores se estabilizan a 50-70 toneladas por hectárea.

5.9.6 LA RECOGIDA DEL MATERIAL VEGETAL DE LOS CAUCES

La recogida del material vegetal de los cauces se articula en las operaciones de derribo, concentración, transformación y finalmente movimiento. No todas estas operaciones son siempre necesarias y su secuencia puede variar largamente, sobretudo en lo que respecta la eventual transformación (Fig 5.4).



Figura 5.4 - Recogida de biomasa leñosa de un cauce (Fuente: Spinelli, 2005).

En efecto, la biomasa leñosa puede ser recogida y cargada así como se presenta cortada, ya sea sobre los medios de transporte (camiones), o bien sin ninguna transformación previa. De otra forma puede sufrir algunos trabajos, con la finalidad de facilitar la recogida y el transporte. La operación más aconsejable es transformar *en situ* el material de baja calidad, que puede representar un porcentaje muy elevado o también la totalidad del material cortado, en conglomerado (Fig 5.5). Esta operación es fundamental cuando se quiere sacar del cauce una voluminosa cantidad de material de bajo valor comercial.

En el caso de los cauces fluviales en general es preferible producir el conglomerado justo después de una breve concentración, efectuada con un *feller-buncher* (Fig. 5.5) o una escavadora. Esto porque el desbosque del material puede ser efectuado para distancias superiores a 20-30 m en dos maneras solamente: por arrastre o por transporte sobre plataforma. El arrastre sobre distancias medio-largas es excesivamente traumático para el suelo del cauce, y es por eso desaconsejable. También el transporte sobre plataforma es desaconsejable, ya que el material de largas dimensiones se transporta con dificultades y no permite utilizar completamente la capacidad de carga de los vehículos empleados.

La logística del área de trabajo es importante, y siempre debe tender a organizar armoniosamente las diferentes operaciones para buscar la máxima eficiencia de la cadena de trabajo. Obviamente ya existen modelos logísticos, que abastecen cadenas de trabajo-tipo adaptadas a específicas condiciones operativas. Tales modelos son llamados sistemas de trabajo.



Figura 5.5 - Recogida de biomasa leñosa (Fuente: Spinelli, 2005).

5.9.6.1 *LOS SISTEMAS DE TRABAJO*

Todos los sistemas de trabajo empleados en los cauces fluviales tienen un factor común: son estudiados para mover material voluminoso y de escaso valor económico. Las diferencias intervienen en la necesidad de adecuarse a la grande variabilidad tipológica del ambiente de trabajo y del material trabajado. En un principio, es posible seguir dos estrategias diferentes, según si se recoge solo el material de deshecho, o también material de deshecho y una cierta cantidad de material con medio-alto valor comercial. En el primer caso, la producción de conglomerado no está asociada a la producción de cualquier otro surtido maderable convencional. En el segundo caso es asociada a la producción de uno o más surtidos maderables comerciales, cuyas proporciones determinan las condiciones de equilibrio entre los dos sistemas de explotación y el resultado económico de la misma operación (Fig 5.6). En este ámbito, hablar de dos sistemas de explotación diferentes puede ser un artificio conceptual, ya que se tiende siempre a usar las mismas máquinas y el mismo personal para producir ambos surtidos. Sobretudo, es importante planificar juntas las dos operaciones, para optimizar el

resultado global. En tal caso se hablará de recogida asociada integrada (Fig. 5.7). Si en cada uno de los sistemas operativos de extracción se opera de forma completamente autónoma, hablaremos de recogida asociada no integrada (Fig. 5.7). Este es el caso típico en el cual una primera empresa efectúa la recogida de los surtidos maderables convencionales, y a trabajo finalizado otra empresa provee a la producción de conglomerado desde el resto del material. Este procedimiento es, en general, el menos racional (Spinelli, 2005) y será tratado solo marginalmente en esta relación.



Figura 5.6 - Acumulación por separado de madera de calidad y material destinado a producción de conglomerado (Fuente: Spinelli, 2005).

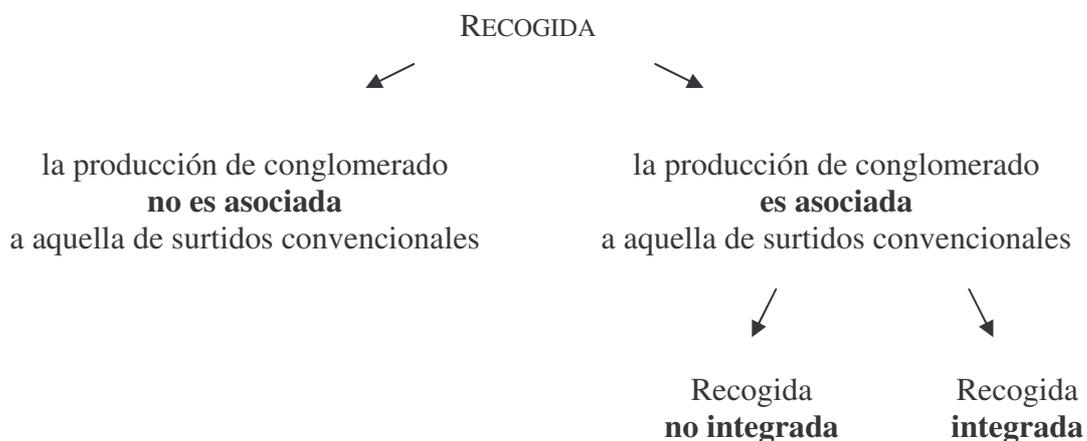


Figura 5.7 - Esquemas de recogida de biomasa leñosa (Fuente: Spinelli, 2005).

5.9.6.2 *La recogida no asociada*

La recogida de la madera generada de la manutención de los cauces puede prever la única producción de conglomerado, sin la recuperación de eventuales surtidos maderables convencionales de mayor valor. Esto puede ser aconsejable en los siguientes casos:

- cuando el diferencial de precio entre dos surtidos y su repartición porcentual no justifica la mayor carga logística de separar los dos productos, organizando dos líneas de producción diferentes;
- cuando faltan las plantas que puedan proporcionar surtidos maderables convencionales. Es el caso de poblaciones relativamente jóvenes o fuertemente degradadas.

El derribo puede ser efectuado con un *feller-buncher*, constituido por una cabeza de derribo montada sobre una excavadora dotada de oruga. La cabeza de derribo debe ser del tipo a disco o a “cizalla”. Los cauces fluviales son demasiados pedregosos para el empleo de una cabeza a cadena. A causa del sotobosque, el operador en la cabina no alcanza a ver bien la posición de la cabeza, y la cadena acabará por golpear los guijarros con demasiada frecuencia, imponiendo pausas excesivas para la sustitución de la afiladura.

En alternativa al *feller-buncher* se puede usar una excavadora con pinza para troncos y soporte-empujador, que trabaja en apoyo de una taladora con motosierra. Este equipo iguala el trabajo del *feller-buncher*, pero requiere una inversión menor. La desventaja está obviamente en la menor eficiencia y en la mayor peligrosidad del trabajo.

La producción de conglomerados es efectuada con una maquina (*cippatrice*) semoviente con motor autónomo y grúa incorporada. Ésta puede moverse y estacionar cerca de las acumulaciones de material. El conglomerado es descargado en los camiones. El descargue del conglomerado es efectuado con un remolque con tracción para las orillas altas aplicados a tractores agrícolas. El cajón es colocado bajo la descarga de la “*cippatrice*”, y se queda allí bajo hasta obtener el llenado total. A este punto el tractor parte en dirección de un sitio alcanzable por los autocarros, elegido oportunamente durante la fase de planificación. El material es descargado en tierra o en contenedores, según los casos. En general se emplean al menos dos unidades de tractores-remolques para cada una de las máquinas para la producción de conglomerado, de modo que ésta no deba esperar la vuelta del mismo tractor antes de poder

empezar a trabajar. La ventaja más evidente de la recogida no asociada está en la posibilidad de proyectar una obra específica para la recogida del conglomerado. Esta especificidad consiente de seleccionar el equipamiento que más se adapte y de simplificar la secuencia de trabajo, que se libera de las operaciones necesarias de la preparación de los productos comerciales. La desventaja es que falta una producción relativamente valorada, que consentiría mejorar la economía global. Por otra parte, la preparación de productos comerciales puede ser más bien laboriosa, e incluso el costo añadido a menudo no es compensado por el incremento del valor, sobretodo cuando tal incremento es muy limitado.

5.9.6.3 *La recogida asociada*

En este caso la producción de conglomerado es asociado a otros surtidos leñosos comerciales, que pueden constituir también una discreta porcentual de recogida, y que en general contribuyen de modo sustancial al producto total financiero. En este caso es necesario coordinar adecuadamente las dos líneas de producción, en modo de optimizar la eficiencia global de la intervención. La recogida de los surtidos leñosos de tipo convencional (troncos, palos, etc.) implica la intervención en la porción dominada en bosques relativamente desarrollados, con una buena porcentual de plantas sanas y de especies apetecibles para los mercados tradicionales (Fig.5.8).



Figura 5.8 - Acumulación de materiales leñosos de calidad en el Fiume Piave (Ponte di Piave, marzo 2003).

La principal ventaja de la recogida asociada es la integración económica entre las dos cadenas de producción, que consiente aumentar el producto total obtenido de la intervención. Generalmente, los productos forestales crecidos en el cauce tienen una composición específica y un estado fitosanitario desfavorable para la producción de grandes cantidades de surtidos tradicionales. El material conglomerado queda como el producto principal, y la posibilidad de comercializarlo adecuadamente es fundamental, así como la capacidad de recogerlo de modo eficaz.

En la práctica, la producción de surtidos comerciales se configura como una producción complementaria, destinada a mejorar la economía global de la intervención, que está de otra forma basada sobre la producción de conglomerado. No obstante, las proporciones efectivas de esta mezcla son extremadamente variables en función del tipo de sotobosque y del mercado de los surtidos leñosos (incluso aquel del conglomerado). Sobre la base de estas consideraciones, las empresas deben desarrollar sus estrategias productivas, que obviamente deberán considerar los recursos técnicos disponibles. Si el precio del conglomerado es muy bajo, la empresa buscará otra forma de producir la máxima cantidad de surtidos convencionales. Llevada al extremo, esta estrategia lleva a la pérdida tanto de la eficiencia operativa que de la buena calidad del producto. La única ventaja es la posibilidad de emplear maquinarias para producir conglomerados (cippatrice) medio-livianas, que producen relativamente poco pero tienen un coste de empleo reducido.

Donde el conglomerado aparece con precios mejores, la empresa puede aumentar el diámetro mínimo de los surtidos convencionales para así producir grandes cantidades de buen “cippato”, junto a un cierto volumen de surtidos convencionales de óptima calidad. En efecto, aquí no es necesario producir la mayor cantidad posible de surtido convencional y se puede optimizar la calidad, produciendo sólo surtidos de valor obtenidos desde las plantas mejores.

Conceptualmente, la recogida asociada se articula en dos obras de trabajo diferentes, destinadas respectivamente a la recogida convencional y a aquella del conglomerado. Sobre la efectiva independencia de las dos obras se basa la distinción entre: recogida no integrada y recogida integrada.

5.9.6.4 *La recogida no integrada*

En este caso, las dos obras de trabajo son totalmente independientes y la recogida del conglomerado se efectúa después de que todo el producto convencional haya sido recogido. La ventaja de la recogida no integrada está en la grande autonomía de las dos obras, que de un lado consiente a cada uno en especializarse en un tipo de trabajo, y del otro permite mantener inalteradas las estructuras productivas tradicionales. Esto permite afrontar con resultado las realidades locales fuertemente conservadoras, que se adaptan con poca voluntad a una reorganización de los sistemas de trabajo tradicionales. En tal caso, la producción de surtidos convencionales continuará a ser efectuada en obras de tipo tradicional, y el conglomerado será recogido en un segundo momento. Así la recogida del material de valor puede ser confiada a una empresa local, ya equipada para este trabajo y dispuesta a pagar un precio interesante por las plantas en pie capaces de producir surtidos de valor (Fig 5.9).



Figura 5.9 - Acumulación y extracción de madera de calidad (Ponte di Piave, marzo 2003).

Las principales desventajas de la recogida no integrada están en la desconexión entre las dos obras, que puede implicar escasa atención a algunos aspectos, fácilmente optimizado donde es posible la integración. En primer lugar, es difícil concordar una estrategia de surtidos que tenga en cuenta las dimensiones óptimas para cada tipo de surtido: el comprador de las plantas capaces de abastecer surtidos convencionales buscará siempre recuperar la mayor cantidad posible, dado que para él el residuo para la producción de conglomerado está ya perdido. Además, querrá perder el menor tiempo posible con una eventual concentración de material libre, prestando poco cuidado a las necesidades de quien deberá recogerlo. La concentración será hecha en forma desordenada (Fig. 5.10), poniendo atención sobretodo a facilitar el tránsito de los propios tractores.



Figura 5.10 - Acumulación desordenada de madera (Ponte di Piave, marzo 2003).

5.9.6.5 *La recogida integrada*

En la recogida integrada es una sola empresa que gestiona la producción asociada de surtidos tradicionales y de conglomerado. Las dos obras son interdependientes y coordinadas por un único centro directivo. El conglomerado y los surtidos maderables convencionales

pueden ser recogidos contemporáneamente o en sucesión, pero la estrategia de recogida y de surtido es de otra forma concebida en modo de optimizar la eficiencia global de las operaciones. Tales optimizaciones se concretizan por ejemplo en la elección de un diámetro mínimo para la producción de surtidos maderables tradicionales. Si la recogida es integrada, la preocupación de la empresa no será aquella de obtener la máxima cantidad de surtido convencional, sino más bien la de aumentar la productividad de ambas obras, así de no perder en una de aquellas lo que puede ganar de la otra. Si el precio del conglomerado lo consiente, la empresa puede aumentar el diámetro del surtido convencional, lo que permite de bajar los costes de producción y contemporáneamente de aumentar la calidad del conglomerado.

Una segunda ventaja de la recogida integrada consiste en la posibilidad de emplear la misma máquina para ambas obras: el mismo tractor o la misma grúa pueden ser usadas para mover sea el surtido tradicional que el deshecho destinado a conglomerado. Esto permite de repartir el coste operativo sobre un mayor volumen de trabajo, y levanta el límite de empleo aconsejado de la mecanización de la segunda obra. Al mismo tiempo, el empleo de una mejor mecanización consiente un incremento de la productividad de trabajo, y por tanto una merma del coste de producción. En fin, la recogida integrada permite a una única empresa gozar de los beneficios de ambas obras de recogida. Es la empresa concesionaria de la corta que cobra ambas obras o que, en el caso de la recogida del conglomerado sea antieconómica pero obligatoria, es capaz de prever directamente a las propias necesidades y acabar por sostener un menor impuesto.

Obviamente, la recogida integrada tiene sus desventajas. Ante todo la necesidad de cambiar el método tradicional, que no todos aceptan fácilmente. En segundo lugar, la integración de las dos obras requiere un esfuerzo organizativo, y arriesga de resolverse en una gran confusión si la empresa demuestra poca profesionalidad (Spinelli, 2005).

5.10 BIBLIOGRAFÍA

Andrich A., (2005). Conoscere la vegetazione riparia: l'influenza del regime idrologico e della manutenzione. In D'Agostino V. & Carraro V. (eds.) *Conoscere il sistema fiume nell'ambiente alpino*, Pubblicazione del Corso di Cultura in Ecologia, Atti del 41° corso, Università di Padova, 46-63.

Civitarese V., (2000). *Interazione fra vegetazione ed alveo in un corso d'acqua*. Tesi di Laurea in Scienze Forestali ed Ambientali, Università della Tuscia.

Della Giacomina F., (2004). Il trattamento della vegetazione in alveo. *Sherwood*, 106.

Preti F. & Bacci M., (2004). La vegetazione ripariale nei corsi d'acqua. *Alberi e Territorio*, 1, 24-27.

Regione Lazio (2002). Manuale di Ingegneria Naturalistica applicabile al settore idraulico.

Regione Toscana (2000 e 2001) – Principi e linee Guida per l'Ingegneria Naturalistica, Voll. 1 e 2, Collana Fiumi e Territorio.

Spinelli R., (2005). Biomassa legnosa e manutenzione degli alvei fluviali. *Alberi e Territorio*. II, 18-22.

EPIC FORCE - UNIPD *El control de detritos leñosos y el manejo de la vegetación en el cauce*

Lenzi M.A., Comiti F., Mao L., Andreoli A., Pecorari E., Rigon E., Picco L.

6 CONCLUSIONES

Los detritos y el material leñoso tienen una fundamental importancia en el interior de los cauces y en los sistemas fluviales porque pueden condicionar, además de las características hidráulicas, aquellas morfológicas y ecológicas del hidro-bio-sistema. La presente guía tiene la finalidad de profundizar en el conocimiento de los aspectos relacionados ya sea con el control de los detritos leñosos, como así también con el manejo de la vegetación en los cauces montanos.

La manutención de la vegetación de ribera nace de la exigencia de garantizar una determinada seguridad desde el punto de vista hidráulico, de modo particular para el fondo del valle y/o el cono de deyección, ya que son zonas que se encuentran habitadas. El abandono del territorio ha condicionado un desarrollo de la vegetación forestal allí donde en otra época se practicaban las actividades típicas agro-silvo-pastorales. La protección desarrollada por los pobladores consentía en tener bajo control la colonización de los árboles por parte de especies riparias o especies pioneras, manteniendo eficiente la red de drenaje principal y secundaria, particularmente en la parte alta de las cuencas hidrográficas.

El aspecto más estudiado a nivel europeo es aquel hidráulico ligado a la defensa del territorio de los fenómenos aluvionales; basta pensar o en el peligro que pueden ocasionar las obstrucciones de material vegetal y de detritos en un torrente con el riesgo de que se produzcan coladas detríticas; o bien, los problemas causados por los bloqueos de los troncos en los puentes y carreteras y el consiguiente aumento de la presión dinámica que puede llevar a la rotura o hundimiento de la estructura de los mismos.

El control, el mantenimiento y la gestión de la vegetación de los cauces debe ser por lo tanto evaluado y realizado en referencia al régimen hidráulico, considerando los diferentes parámetros que influyen en la dinámica de la vegetación al interior del cauce y en el sistema fluvial. En este sentido es importante definir cuáles son los límites y los confines ya sea en lo que respecta al tema de la seguridad hidráulica de las poblaciones y centros urbanos, como así también en lo que respecta a la valencia ambiental del hidrosistema fluvial, con la finalidad de establecer un posible equilibrio entre estos dos aspectos tan importantes en la gestión del territorio.

En este sentido, una gestión orientada al mantenimiento de la vegetación en el cauce que podría comprender la no total eliminación de la misma cuidando más bien su control y teniendo también en cuenta un manejo ordenado de las riberas por la importancia que desarrolla la vegetación arbustiva riparia ya sea bajo el perfil de la función de filtro ecológico y de la defensa de la erosión, es el enfoque que se propicia, compatibilizándolo con la salvaguardia de la sección hidráulica necesaria al pasaje de los caudales líquidos y sólidos extraordinarios característicos del sistema fluvial considerado.

Este nuevo enfoque en la gestión de los cauces fluviales en Italia ha sido acompañado de un desarrollo legislativo y normativo no siempre unívoco y caracterizado por avances y también por cambios de dirección en los lineamientos de las políticas llevadas adelante por las organismos y administraciones regionales y nacionales. Se rescata como elemento de importancia aquel de las cortas programadas y selectivas de la vegetación en los cauces, y la necesidad de considerar una programación integral de las intervenciones al fin de lograr un equilibrio entre la seguridad hidráulica y el mantenimiento de las funciones ecológicas y ambientales del ecosistema fluvial.

En esta guía se evidencian también, en particular modo en los capítulos 3 y 4, aspectos relacionados con la tipología, funciones y dimensionamiento de diques selectivos y de diques selectivos especialmente ideados para la retención de la madera y detritos leñosos, como elementos de la tradición del control estructural, utilizados en la regulación y control del caudal sólido asociado al transporte de detritos leñosos en cauces fluviales. Un aspecto éste último complementario a la gestión integral del fenómeno, pero no menos importante, ya que ha visto la experimentación y realización de obras ad-hoc en particular en Japón, Italia, Austria y Suiza, basadas en pruebas y observaciones de laboratorio y de campo.

Publicación Especial EPIC FORCE – UNIPD

Best practice guidelines for dealing with large woody debris

El control de detritos leñosos y el manejo de la vegetación en el cauce

Lenzi M.A., Comiti F., Mao L., Andreoli A., Pecorari E., Rigon E., Picco L.

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Università degli Studi di Padova

Viale dell'Università, 16

35020 Legnaro (PD) ITALY

Padova, Septiembre de 2007