



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 D23

Guidelines improved catchment management

ESTRATEGIAS PARA EL CONTROL DE LOS FENÓMENOS TORRENCIALES Y LA ORDENACIÓN SUSTENTABLE DE LAS AGUAS, SUELOS Y BOSQUES DE LAS CUENCAS DE MONTAÑA

Equipo EPIC FORCE
Universidad Politécnica de Madrid (España)
Juan Ángel Mintegui Aguirre; José Carlos Robredo Sánchez

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: Universidad Politécnica de Madrid
Revision (final)

Projects 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
DELIVERABLE 23**

Guidelines improved catchment management

**ESTRATEGIAS PARA EL CONTROL DE LOS
FENÓMENOS TORRENCIALES Y LA ORDENACIÓN
SUSTENTABLE DE LAS AGUAS, SUELOS Y BOSQUES
DE LAS CUENCAS DE MONTAÑA**

**EQUIPO EPIC FORCE
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (ESPAÑA)**

Juan Ángel Mintegui Aguirre; José Carlos Robredo Sánchez

César López Leiva; Juan Ignacio García Viñas; Carlos de Gonzalo Aranoa; Pablo Huelin Rueda; Nur Algeet Abarquero, Cristina Maldonado Gallego; Juan Ballesteros Cánovas

**EQUIPO EPIC FORCE
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COSTA RICA (COSTA RICA)**

Miriam Miranda; Jorge Fallas

UNIVERSIDAD DE CUENCA (ECUADOR)

Felipe Cisneros; Pedro Cisneros; Bert De la Briève

**SUBSECRETARIA DE RECURSOS NATURALES DE TIERRA DE FUEGO
(ARGENTINA)**

Adriana Urciuolo; Rodolfo Iturraspe; Leonardo Collado

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA (ARGENTINA)

Marcelo Gaviño; Ramiro Sarandón; Verónica Guerrero Borges

UNIVERSIDAD AUSTRAL (CHILE)

Andrés Iroume; Anton Huber; Jorge Gayoso; Silvana Gayoso

SUMMARY

In order to improve the management of catchments, we need: 1) Knowing its physical and socio-economic features, the former related to morphology, relief, climate, soils and land use. 2) Predicting rationally its behaviour in case of likely disturbing phenomena, like torrential events –specially, extreme- or sudden snowmelt. 3) Knowing the current and real situation of its physical and socio-economic state concerning, *a*) the productive potentialities and development possibilities and *b*) lacks and occurring degradation processes. 4) Clarifying aims to be achieved with the applied improvement practices. 5) Knowing the appropriate techniques and their implementation to be applied for the improved catchments. All those aspects are developed as strategies throughout the following *Guidelines for improved catchment management*.

The document begins (paragraph 1) defining main effects caused by torrential events in catchments and their impacts on human populations. It also set out the origin of traditional catchment management focused on protection against such events and on sustainable land use; finally, it puts forward the *status quo* of most appropriate practices and techniques within catchment management for different natural scenarios according to altitude, relief and potential vegetation.

The text follows (paragraph 2) analysing the influence of forests in water and sediments cycles and the impacts on control of effects derived from torrential geo-dynamics in case of torrential events in the catchment. A study of effects of forests on water availability and supply is also added, particularly during periods between extreme events.

The paragraph 3 shows the outlines of *the Agro-Hydrological Management and the Water & Forest Restoration* for catchments within EPIC FORCE Project, stating the specific contents of both concepts and adopting as essential objectives: 1) Protection of catchments in order to diminish the geo-torrential effects likely to be caused by torrential rainfalls, either normal or extreme, or sudden snowmelt and 2) Optimal use of water and soil resources –the sustainable use.

The paragraph 4 includes the economic analysis of the Agro-Hydrological Management of catchments in connection with the two mentioned aims: 1) Watershed protection against triggering torrential events and 2) Sustainable use.

The paragraph 5 is focused on a preliminary application of the outlines of the *Agro-hydrological Management* implemented within EPIC FORCE Project to different Latin American basins located on various geographic regions: Pejibaye river (Costa Rica) and also Chanchán -and its tributary Guabalcón- catchments (Ecuador), which represent tropical medium and high mountain Latin American areas; and Buena Esperanza stream watershed, in the province of Tierra del Fuego (Argentina), representative of the Andean-Patagonic region. In addition, *best practices* are also set out to be taken into account for actions undertaken in plantation forests with fast-growth species in Valdivia region (Chile) with the aim of achieving *forest certification*.

The document is ended with a set of conclusions and recommendations. One of the most outstanding ones is that the myth of forests as protectors against any type of event or, specifically, the forest lack as the cause of all disasters and losses is a sentence that

should not be honest to be conveyed that way. Forests protect efficiently against foreseeable effects of common torrential events (with short Return Periods), but have not the same needed efficiency for extreme torrential events, whose Returns Periods are much longer and frequency much lower. Thinking that forests are useless since they do not protect us against extreme events is, in fact, a lie and a real threat for the sustainable use of water and forest resources, because 'none hazard' situation does not exist and society must be made aware of that. We should assume that the high magnitude of damages taking place for an extreme event are not owing to the forests lack itself but to the occupation pattern in dominated, flooded dominated valleys, by human populations and infrastructures. On the other side, forests occurrence on upper areas of the catchments can greatly lessen damages derived from common torrential events in dominated areas. Within that background, forests protection for different torrential effects can be compared with the effects of the *car security seatbelt*: it may protect us in an effective way in case of an accident at 90 km/hr; but in case of a head-on crash driving at 200 km/hr, possibilities of protection are minimal even with the seatbelt fastened. In spite of that, nobody question its mandatory use.

In connection with forests-water relationships during periods between extreme events, we must consider that forests are the best-using plant communities for available water, soil and energy, thus becoming the most stable. But the *Agro-Hydrological Management* must also take into account needs of inhabitants, so that it is necessary to combine forests with other land uses providing resources for population subsistence. Forests function is therefore the one of the equivalent infrastructure to avoid physical degradation and maintain the biological balance during periods between torrential events. In the case of Andean tropical high mountain catchments, the well-conserved *pajonal del páramo* have the same functional behaviour as forests of upper areas of European alpine catchments.

The *Agro-Hydrological Management* and the *Water & Forest Management* are both technical actions, but also intensively cultural and conceived for human populations. Their final aim is to combine human needs with natural capacities and limitations of environment where they lay within. That is what in the past was known as *persistence* among mountain managers and restorers and nowadays is named *sustainable development*.

RESUMEN

Para mejorar el tratamiento de una cuenca vertiente, se precisa: 1) Conocer sus características tanto físicas (morfológicas y de relieve; climáticas; de suelos y de uso del suelo o vegetación) como socio-económicas. 2) Prever racionalmente su comportamiento ante los fenómenos que puedan perturbarla, como son los eventos torrenciales, especialmente los extraordinarios, y las fusiones repentinas del manto de nieve. 3) Conocer la realidad actual del estado físico y socio-económico de la cuenca: *a)* en lo que respecta a sus potencialidades productivas y sus posibilidades de desarrollo y *b)* en lo que se refiere a sus carencias y procesos de deterioro que en la misma se presentan. 4) Tener muy claros los objetivos que se pretenden conseguir con las medidas adoptadas para mejorar la cuenca. 5) Conocer las técnicas apropiadas y su modo de empleo para aplicar a la cuenca a fin de mejorarla. Todos estos aspectos se desarrollan en esta *Guidelines improved catchment management*, a modo de estrategias.

El documento comienza (apartado 1) definiendo los principales efectos causados por los eventos torrenciales en una cuenca hidrográfica y sus posibles repercusiones sobre la población que se asienta en ella. Establece el origen de las ordenaciones de cuencas vertientes tradicionales, para protegerse de tales eventos y para mantener el aprovechamiento sustentable de la cuenca y, finalmente, presenta un estado del arte de las medidas y técnicas apropiadas para la ordenación y restauración de cuencas vertientes en diferentes escenarios naturales, en función de la altitud, el relieve y la vegetación potencial en la cuenca en cuestión.

Continúa (apartado 2) analizando la incidencia de los bosques en los ciclos del agua y de los sedimentos y su repercusión en el control de los efectos causados por el geodinamismo torrencial en la cuenca vertiente, cuando en ella acontecen eventos torrenciales. También se estudia el efecto de los bosques en la disponibilidad de los recursos hídricos de la cuenca en los periodos que transcurren entre eventos torrenciales.

En el apartado 3 presenta el esquema de la *ordenación agro-hidrológica* y de la *restauración hidrológico-forestal* de la cuenca propuesta en el Proyecto EPIC FORCE, demarcando los contenidos específicos de ambos conceptos y adoptando como objetivos esenciales para ambos los siguientes: 1) La protección de la cuenca vertiente, para amortiguar los efectos geo-torrenciales que le puedan causar las precipitaciones torrenciales, tanto ordinarias como extraordinarias, o las repentinas fusiones del manto de nieve que sucedan en la misma y 2) El mejor aprovechamiento de los recursos agua y suelo en la cuenca hidrográfica, es decir, su aprovechamiento sustentable.

En el apartado 4 plantea el análisis económico de la ordenación agro-hidrológica de una cuenca vertiente en relación con los dos objetivos mencionados: 1) La protección de la cuenca ante eventos torrenciales que sucedan en ella. 2) El aprovechamiento sustentable de la misma.

El apartado 5 se centra en una aplicación preliminar del esquema de la *ordenación agro-hidrológica*, adoptado en el proyecto EPIC FORCE, a distintas cuencas vertientes de América Latina situadas en diferentes ámbitos geográficos. Se trata de las cuencas del río Pejibaye (Costa Rica) y del río Chanchán y su afluente el río Guabalcón (Ecuador), representantes de las áreas tropicales de media y alta montaña de América Latina, y

la cuenca vertiente al arroyo de Buena Esperanza situado en la Provincia de Tierra del Fuego (Argentina), representativa del área andino-patagónica. También se han comentado las *buenas prácticas* a considerar en las operaciones forestales a efectuar en las repoblaciones con especies de crecimiento rápido de la región de Valdivia (Chile), para conseguir la *certificación ambiental*.

El documento se cierra con una serie de conclusiones y recomendaciones, entre las que se destaca que el mito que *el bosque protege ante cualquier evento torrencial* o, dicho de un modo más concreto, *que la falta de bosque es la causa de todos los desastres y pérdidas*, no es honesto presentarlo como tal. El bosque nos protege eficientemente de los efectos previsibles de los eventos torrenciales ordinarios, es decir, de los que se presentan con periodos de recurrencia cortos, que son los de más frecuentes; pero puede no presentar la eficiencia que se necesita ante eventos torrenciales extremos, cuya recurrencia es mucho más elevada y su frecuencia mucho más reducida. Plantear que si el bosque no sirve ante eventos extremos no sirve para nada es una auténtica falacia y una verdadera amenaza para planificar el uso sostenible de los recursos agua y suelo en la cuenca vertiente, pues el riesgo cero no existe y la sociedad debe saberlo. Se debe asumir que la elevada magnitud de los daños que tienen lugar durante un evento extremo, no se debe tanto a la ausencia del bosque en sí, sino a la ocupación de las áreas dominadas o de inundación por la población y sus infraestructuras. Por otro lado, la existencia del bosque en las áreas dominantes de la cuenca, puede disminuir sensiblemente los daños en dichas zonas ocupadas ante de eventos torrenciales ordinarios. En este contexto, la protección que ofrece el bosque a la cuenca vertiente ante los diferentes eventos torrenciales se podría asimilar con el efecto del *cinturón de seguridad* para el conductor de un automóvil. Lo previsible es que si el conductor sufre un accidente circulando a 90 kilómetros por hora, el llevar puesto el cinturón le resulte efectivo; pero si el vehículo supera los 250 kilómetros por hora, lo normal es que el cinturón no surta ningún efecto. A pesar de ello, no se cuestiona la obligatoriedad de utilizar el cinturón.

En cuanto a la relación del bosque y el agua en el periodo que transcurre entre eventos extremos, el bosque es la formación vegetal que mejor aprovecha las condiciones de agua, suelo y energía disponibles y, por tanto, la más estable; pero en la *ordenación agro-hidrológica* de una cuenca es preciso considerar también las necesidades de la población que habita en la misma y, en tal sentido, resulta necesario compaginar el bosque con otros usos del suelo que proporcionan los medios necesarios para el mantenimiento de dicha población; reservando al bosque la función de infraestructura que le corresponde, que sirva para proteger a la cuenca ante eventos torrenciales, para evitar su degradación física y para mantener su equilibrio biológico durante los periodos entre eventos torrenciales. Tratándose de cuencas tropicales andinas de alta montaña, el *pajonal del páramo*, si se encuentra bien conservado, realiza las mismas funciones protectoras que los bosques de cabecera de las cuencas alpinas en Europa.

La *ordenación agro-hidrológica* y la *restauración hidrológico-forestal* son actuaciones técnicas, pero profundamente culturales y pensadas para la población; siendo su propósito final compaginar sus necesidades con las capacidades y limitaciones naturales del medio donde se asientan, para asegurar el presente y futuro de los recursos naturales; lo que en el pasado se conocía entre los ordenadores y restauradores de las tierras de montaña con el vocablo *persistencia* y actualmente por *desarrollo sustentable*.

PROLOGO

Las montañas, por su propia posición geográfica y por sus características topografías, son las superficies más vulnerables ante el fenómeno geo-torrencial desencadenado por los eventos torrenciales extraordinarios. La necesidad de protección de las cuencas de montaña ante los daños o catástrofes, dependiendo de la intensidad de los eventos geotorrenciales, para salvaguardar a sus habitantes y a sus bienes, constituyó desde el inicio el objetivo esencial de la restauración hidrológico-forestal; que incluía tanto la corrección de los torrentes mediante obras hidráulicas, para regular sus flujos en los momentos de crecida; como la repoblación forestal de sus cuencas vertientes, para laminar con ello el caudal de crecida en los torrentes y, sobre todo, para evitar en lo posible la incorporación de un importante caudal sólido a la corriente precisamente durante su crecida.

Pero intrínsecamente asociado a este objetivo, se debe atender al desarrollo sustentable de las propias cuencas de montaña, especialmente cuando, como ocurre en América Latina, éstas se encuentran pobladas y sus habitantes utilizan los recursos agua y suelo de las mismas para su subsistencia. Garantizar la permanencia de dicha población en las áreas que ocupan, manteniendo en lo posible su modo de vida y mejorando sus condiciones de existencia, sin que ello suponga ni mayores riesgos ante los eventos torrenciales extraordinarios, ni un empobrecimiento de los recursos naturales de la cuenca que pudiera hipotecar su futuro, constituye la ampliación imprescindible del objetivo anterior. Abordarlo implica la *ordenación agro-hidrológica*, es decir, la ordenación de los recursos agua, suelo y cubierta vegetal de las citadas cuencas, que garantice su aprovechamiento sustentable, sin prescindir del control ante los posibles riesgos naturales de origen torrencial o de la fusión repentina del manto de nieve; así como también la *restauración hidrológico-forestal*, o mejora de las condiciones de la corriente en los cursos torrenciales y de las superficies arboladas en sus cuencas alimentadoras, cuando el aspecto del cauce o el estado de degradación de la cubierta vegetal de su cuenca lo demandan.

En base a estos dos objetivos se configuró el contenido del programa de trabajo del equipo de la Universidad Politécnica de Madrid en el Proyecto de Cooperación Internacional financiado por la Unión Europea EPIC FORCE (Evidence based policy for integrated control of forested river catchments in extreme rainfall and snowmelt – Políticas basadas en la evidencia científica para la gestión integrada de cuencas hidrográficas forestadas frente a precipitaciones extremas y fusiones repentinas del manto de nieve), liderado por el Profesor J. C. Bathurst de la Universidad de Newcastle (Reino Unido).

La restauración hidrológico-forestal tiene sus antecedentes en los trabajos de corrección de los torrentes de montaña, que se iniciaron a mediados del siglo XIX en los países europeos con amplias superficies montañosas y con graves síntomas de deforestación; para evitar de este modo los riesgos por inundaciones y sobre todo los aterramientos causados por los sedimentos aportados por los torrentes en crecida en los valles de montaña, donde se ubicaban básicamente los núcleos de población y por donde transitaban las principales vías de comunicación. Pronto se percataron que para asegurar en el tiempo el efecto de tales correcciones, resultaba necesaria la rehabilitación de las cuencas vertientes a dichos torrentes, es decir, la restauración de la cubierta vegetal de

las áreas de montaña; lo que normalmente abordaron a través de la repoblación forestal de las mismas hasta donde la topografía y la climatología lo permitían.

Volviendo al propósito del Proyecto EPIC FORCE, éste, como lo indica su nombre, es el que demostrar científicamente el alcance de la influencia de las masas arboladas en el comportamiento de los ciclos del agua y de los sedimentos dentro de la cuenca vertiente, ante la incidencia en ella de eventos torrenciales extremos; para que los habitantes de la cuenca se formen criterios claros y sólidos y puedan adoptar las medidas pertinentes ante los efectos previsibles de tales eventos. Este documento D23 representa la adecuación de otro anterior D10 (*Review of current and best practices managements*) a la realidad de las áreas de montaña de América Latina, para lo que el equipo de la Universidad Politécnica de Madrid ha contado con la inestimable colaboración de las Universidades Latinoamericanas integradas en este Proyecto.

El proyecto EPIC FORCE se ha configurado en base a diferentes programas de trabajo. En este contexto, el programa de los trabajos de modelación de los fenómenos hidrológicos y geo-torrenciales ha sido abordado por el equipo de la Universidad de Newcastle, a través del modelo SHEATRAN aplicado por J. C Bathurst y S. J. Birkinshaw. Asimismo el equipo de la Universidad de Padua, liderado por M. Lenzi, ha llevado a cabo una importante investigación encaminada a conocer el comportamiento de los depósitos leñosos de grandes dimensiones que son transportados por las avenidas que tienen lugar en los cursos torrenciales; completando el trabajo propiamente de investigación, recopilado en el Deliverable D21, con un documento de aplicación el Deliverable D22 (*Best practice guidelines for dealing with large woody debris*) que en el campo específico de los cursos torrenciales muestra una visión actualizada y práctica del problema en cuestión. Los resultados de todas las investigaciones mencionadas han sido implícitamente tenidos en cuenta en el contenido de esta publicación; pero lo determinante en la misma ha sido, como se ha adelantado, la colaboración de los socios de América Latina, que han aportado la información necesaria para conocer la realidad física de las cuencas vertientes de montaña objeto este Proyecto, así como para precisar los correspondientes comportamientos hidrológicos *in situ* en diferentes situaciones y la utilización que los habitantes de dichas cuencas hacen de sus principales recursos: el agua y el suelo y, finalmente, de los problemas con los que se enfrentan ante la aparición repentina de eventos extremos. También conviene señalar que entre todas las cuencas del Proyecto abarcan un amplio espacio geográfico, desde el bosque tropical de media montaña en Costa Rica, hasta el bosque de *Nothofagus* en Tierra de Fuego al sur de Argentina.

De este modo nuestro equipo ha podido visitar y compartir criterios con el equipo de la Universidad Nacional de Costa Rica (liderado por M. Miranda y J. Fallas) en lo que respecta a la cuenca del río Pejibaye, cubierta hasta mediados del siglo pasado por un bosque tropical de media montaña, que fue desmontado para su puesta en producción agraria por la población que se instaló en ella. También se visitó acompañado por el equipo de la Universidad de Cuenca (Ecuador), liderado por F. Cisneros, la cuenca del río Chanchán y especialmente la de su afluente el río Guabalcón, situada en un área tropical de alta montaña. En dichas visitas P. Cisneros nos expuso con extraordinaria claridad la edafología y los usos tradicionales del suelo en la región y también pudimos comprobar de *visu* los riesgos en ambas cuencas ante los previsibles eventos torrenciales.

Al sur del Continente, el equipo EPIC FORCE de la Universidad Austral de Chile, liderado por A. Irouné, nos acompañó a visitar las áreas de plantaciones forestales de crecimiento rápido y nos explicaron los criterios científicos incorporados a los documentos de Certificación Forestal (A. Hubert, J. Gayoso y S. Gayoso).

Más al sur, en el extremo del Continente, se recorrió en dos ocasiones la cuenca vertiente al arroyo de Buena Esperanza, alimentadora de la ciudad de Ushuaia, capital de la Provincia argentina de Tierra de Fuego. La responsable del equipo EPIC FORCE en esta región, A. Urciolo, directora de Recursos Hídricos de la Subsecretaría de Recursos Naturales de la Provincia, y R. Iturraspe nos explicaron las características específicas de esta cuenca y la importancia de verificar científica y técnicamente la necesidad de mantener su cubierta arbórea en buen estado, por la función hidrológica y capacidad de sujeción del suelo que desempeñan, lo que afecta en el suministro de agua a la ciudad y en la protección de ésta ante desastres naturales de tipo geo-torrencial. También ha contribuido eficazmente el equipo de la Universidad de La Plata, liderado por M. Gaviño y R. Sarandón, con su análisis de la caracterización de los eventos torrenciales en función de los riesgos que de ellos se prevén, que ha sido incorporado al capítulo de análisis económico de este texto.

En la estructuración de la primera parte de esta publicación, se ha utilizado la experiencia española en proyectos de restauración hidrológico-forestal de cuencas vertientes, que, como es lógico, se ha inspirado y alimentado de la tradición en corrección de torrentes y restauración de montañas de los países de su entorno, en especial los situados al sur de Europa y con importantes cadenas montañosas en su territorio (Francia, Italia, Suiza, Austria, la región alemana de Baviera, los países Balcánicos y Grecia), que a partir de la década de los años cincuenta del siglo pasado, se han reunido cada dos años para intercambiar experiencias en las sesiones del Grupo de Trabajo de Ordenación de Cuencas de Montaña, dentro de la Comisión Forestal Europea de la FAO. A lo largo de dichas sesiones se han analizado supuestos de corrección de torrentes y de sus cuencas vertientes, tanto teóricos como especialmente prácticos; se han estudiado proyectos ya efectuados y se han propuesto mejoras para futuras realizaciones; sin olvidar los avances derivados de la investigación en las ciencias complementarias a las específicamente de corrección de cuencas torrenciales de montaña.

Pero también se ha tenido en cuenta la necesidad de reforzar científicamente los proyectos de corrección de cuencas vertientes y, sobre todo, se han incorporado los elementos necesarios para poder llevar a cabo la *ordenación agro-hidrológica de las cuencas* de América Latina, que han aportado los socios latinoamericanos del Proyecto EPIC FORCE.

En síntesis, se ha tratado de redactar una Guía para la *ordenación sustentable de las aguas, suelos y cubiertas vegetales en las cuencas de montaña de América Latina*, conjugando la tradición europea en estas técnicas con los conocimientos empíricos de las regiones andinas, para proporcionar un documento útil y ajustado a la realidad. Unas cuencas que, en general, sorprenden por su belleza natural; en ocasiones, en la más pura orientación estética de colores y formas, otras veces por la sublimidad de sus abruptos paisajes; pero que, tras el impacto visual inicial, se muestran vulnerables ante los eventos torrenciales y, por tanto, necesitados de nuestra atención. Por ello se requiere de políticas adecuadas para su manejo sostenido, aspecto que es abordado por otro de los

programas de trabajo del Proyecto liderado por J. Amézaga de la Universidad de Newcastle.

Finalmente, señalar que en hidráulica torrencial y en ordenación de las cuencas hidrográficas de montaña no existen soluciones definitivas; porque éstas resultan condicionadas a los eventos torrenciales, que son aleatorios; pero existen soluciones efectivas y prácticas, que son a las que queremos dirigir a nuestros lectores. Solo nos resta esperar que el trabajo que se presenta resulte de utilidad para este propósito.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN: CAUSAS, ORIGEN Y ÁMBITO DE APLICACIÓN DE LA ORDENACIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS	<i>pp. 1</i>
1.1. Los efectos de los eventos torrenciales en la cuenca hidrográfica: Principios y conceptos relacionados con la ordenación de cuencas vertientes	<i>pp. 1</i>
1.2. Origen de las diferentes concepciones de la ordenación de cuencas vertientes ante las necesidades surgidas en ellas en el transcurso de su historia reciente	<i>pp. 5</i>
1.3. Actuaciones hidrológico-forestales en las cuencas vertientes que representan distintos escenarios naturales (estado del arte)	<i>pp. 6</i>
1.3.1. Análisis del escenario I.1.A.	<i>pp. 10</i>
1.3.1.1. Descripción	<i>pp. 10</i>
1.3.1.2. Fenomenología geo-torrencial	<i>pp. 10</i>
1.3.1.3. Esquema corrector	<i>pp. 10</i>
1.3.2. Análisis del escenario I.2.A.	<i>pp.15</i>
1.3.2.1. Descripción	<i>pp. 15</i>
1.3.2.2. Fenomenología geo-torrencial	<i>pp. 15</i>
1.3.2.3. Esquema corrector	<i>pp. 15</i>
1.3.3. Análisis del escenario I.1.B.	<i>pp. 20</i>
1.3.3.1. Descripción	<i>pp. 20</i>
1.3.3.2. Fenomenología geo-torrencial	<i>pp. 20</i>
1.3.3.3. Esquema corrector	<i>pp. 20</i>
1.3.4. Análisis del escenario I.2.A.	<i>pp.22</i>
1.3.4.1. Descripción	<i>pp. 22</i>
1.3.4.2. Fenomenología geo-torrencial	<i>pp. 22</i>
1.3.4.3. Esquema corrector	<i>pp. 22</i>
1.3.5. Análisis del escenario II.1.A.	<i>pp. 24</i>
1.3.5.1. Descripción	<i>pp. 24</i>
1.3.5.2. Fenomenología geo-torrencial	<i>pp.24</i>
1.3.5.3. Esquema corrector	<i>pp. 24</i>
1.3.6. Análisis del escenario II.2.A.	<i>pp.27</i>
1.3.2.1. Descripción	<i>pp. 27</i>
1.3.2.2. Fenomenología geo-torrencial	<i>pp. 27</i>
1.3.2.3. Esquema corrector	<i>pp. 27</i>
1.3.7. Análisis del escenario II.1.B.	<i>pp. 30</i>
1.3.3.1. Descripción	<i>pp. 30</i>
1.3.3.2. Fenomenología geo-torrencial	<i>pp. 30</i>
1.3.3.3. Esquema corrector	<i>pp. 30</i>
1.3.8. Análisis del escenario II.2.B.	<i>pp.32</i>
1.3.4.1. Descripción	<i>pp. 32</i>
1.3.4.2. Fenomenología geo-torrencial	<i>pp. 32</i>
1.3.4.3. Esquema corrector	<i>pp. 32</i>

- 2. LA INCIDENCIA DEL BOSQUE EN EL CICLO DEL AGUA Y SU REPERCUSIÓN EN LA ORDENACIÓN AGRO-HIDROLÓGICA Y EN LA RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-FORESTAL DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS** *pp. 35*
- 2.1. Los efectos del bosque en la laminación de las avenidas y en el control de los procesos geo-torrenciales que se desencadenan en la cuenca, por causa de los eventos torrenciales o por la repentina fusión del manto de nieve *pp. 37*
- 2.1.1. Los efectos del bosque en la formación de los caudales líquidos y en la laminación de las avenidas *pp. 37*
- 2.1.2. Los efectos del bosque en la protección del suelo y en el control de los procesos geo-torrenciales que se desencadenan en la cuenca *pp. 41*
- 2.1.2.1. *Los efectos del bosque ante el geo-dinamismo torrencial desencadenado en las pequeñas cuencas de montaña* *pp. 42*
- 2.1.2.2. *Los efectos del bosque ante el geo-dinamismo torrencial que se manifiesta en las cuencas fluviales* *pp. 43*
- 2.1.3. Los efectos del bosque en el control de los fenómenos nivales *pp. 56*
- 2.2. La repercusión de las cubiertas arboladas en las disponibilidades hídricas de la cuenca vertiente en los periodos que transcurren entre eventos torrenciales consecutivos *pp. 57*
- 2.2.1. La relación clima-bosque. Controversias entre los principios asumidos por los naturalistas y la necesidad de pruebas para corroborarlos *pp. 58*
- 2.2.2. Las experiencias en cuencas comparadas *pp. 59*
- 2.2.2.1. *El efecto de las superficies arboladas de la cuenca en las inundaciones* *pp. 61*
- 2.2.2.2. *El efecto de las superficies arboladas en los caudales base* *pp. 62*
- 2.2.2.3. *El efecto de la recuperación de la cubierta arbolada en la cuenca vertiente tras su deforestación* *pp. 62*
- 2.3. Síntesis de los efectos del bosque sobre los recursos agua y suelo en la cuenca hidrográfica *pp. 67*
- 2.3.1. La inferencia del bosque en los efectos finales que los eventos torrenciales pueden causar en la cuenca vertiente *pp. 67*
- 2.3.2. La inferencia del bosque en los recursos hídricos de la cuenca vertiente *pp. 71*
- 3. ESQUEMA DE LA ORDENACIÓN AGRO-HIDROLÓGICA Y DE LA RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-FORESTAL PARA UNA CUENCA VERTIENTE EN EL PROYECTO EPIC FORCE** *pp. 79*

- 3.1. Objetivos de la ordenación agro-hidrológica y de la restauración hidrológico-forestal en una cuenca vertiente *pp. 79*
- 3.2. Resumen del estado de la cuestión en relación con la ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente *pp. 80*
- 3.3. Parámetros y modelos físicos a considerar en la ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente *pp. 85*
- 4. ANÁLISIS ECONÓMICO DE LOS BENEFICIOS PREVISIBLES EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA CON LA APLICACIÓN DE LAS MEDIDAS RESTAURADORAS, ADOPTADAS CON LOS CRITERIOS DEFINIDOS EN SU ORDENACIÓN AGRO-HIDROLÓGICA** *pp. 95*
- 4.1. Análisis de los efectos que ejercen las medidas de control del geo-dinamismo torrencial en la cuenca vertiente, en la protección de sus áreas dominadas *pp. 99*
- 4.1.1. Particularización del análisis económico a la protección que ejerce a la población de Ushuaia el bosque de Nothofagus situado aguas arriba de la misma en la cuenca vertiente al arroyo de Buena Esperanza *pp. 102*
- 4.2 Análisis de los beneficios que reporta la ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente en relación con su desarrollo sustentable *pp. 114*
- 5. APLICACIÓN PRELIMINAR DEL ESQUEMA DE LA ORDENACIÓN AGRO-HIDROLÓGICA, ADOPTADA EN EL PROYECTO EPIC FORCE, A CUENCAS VERTIENTES DE AMÉRICA LATINA SITUADAS EN DIFERENTES ÁMBITOS GEOGRÁFICOS** *pp. 119*
- 5.1. Ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al río Pejibaye (Costa Rica) *pp. 122*
- 5.1.1. Breve descripción del estado físico de la cuenca vertiente al río Pejibaye *pp. 122*
- 5.1.2. Enfoque principal de la ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al río Pejibaye *pp. 123*
- 5.1.3. Tabla de la ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al río Pejibaye *pp.123*
- 5.2. Ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al río Chanchán (Ecuador) *pp. 130*
- 5.2.1. Breve descripción del estado físico de la cuenca vertiente al río Chanchán *pp. 130*
- 5.2.2. Enfoque principal de la ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al río Chanchán *pp. 130*
- 5.2.3. Tabla de la ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al río Chanchán *pp.133*

5.2.4.	Breve descripción del estado físico de la cuenca vertiente al río Guabalcón	<i>pp. 138</i>
5.2.5.	Enfoque principal de la ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al río Guabalcón	<i>pp. 139</i>
5.2.6.	Tabla de la ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al río Guabalcón	<i>pp.142</i>
5.3.	Ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al arroyo de Buena Esperanza (Tierra del Fuego, Argentina)	<i>pp. 147</i>
5.3.1.	Breve descripción del estado físico de la cuenca vertiente al arroyo de Buena Esperanza	<i>pp. 147</i>
5.3.2.	Enfoque principal de la ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al arroyo de Buena Esperanza	<i>pp. 148</i>
5.3.3.	Tabla de la ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al arroyo de Buena Esperanza	<i>pp.149</i>
5.4.	Guía de buenas prácticas para minimizar la generación y emisión de sedimentos en las cuencas repobladas con especies de crecimiento rápido, sometidas a operaciones forestales (región de Valdivia, Chile)	<i>pp. 151</i>
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	<i>pp. 153</i>
6.1.1.	La incidencia del bosque en el ciclo del agua y en la dinámica geo-torrencial que se desencadena en la cuenca vertiente, cuando en la misma suceden precipitaciones torrenciales o repentinas fusiones del manto de nieve	<i>pp. 153</i>
6.1.2.	La repercusión de las cubiertas arboladas en las disponibilidades hídricas de la cuenca vertiente en los periodos que transcurren entre eventos torrenciales	<i>pp. 159</i>
6.1.3.	La ordenación agro-hidrológica y la restauración hidrológico-forestal como instrumentos de protección y aprovechamiento sustentable de la cuenca vertiente	<i>pp.162</i>
7.	BIBLIOGRAFÍA Y DOCUMENTOS CONSULTADOS	<i>pp. 167</i>

1. INTRODUCCIÓN: CAUSAS, ORIGEN Y ÁMBITO DE APLICACIÓN DE LA ORDENACIÓN Y RESTAURACIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

1.1. LOS EFECTOS DE LOS EVENTOS TORRENCIALES EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA: PRINCIPIOS Y CONCEPTOS RELACIONADOS CON LA ORDENACIÓN DE LAS CUENCAS VERTIENTES

La cuenca hidrográfica o cuenca vertiente se ha definido tradicionalmente como la *unidad de estudio y gestión*. Lo primero es evidente, pues la cuenca representa un espacio perfectamente definido del territorio, en el que se puede plantear todo el ciclo del agua en intrínseca relación con él; pero lo segundo también lo es, porque la cuenca se encuentra normalmente poblada y sus habitantes necesitan de sus recursos para subsistir. El agua y el suelo constituyen los recursos más importantes que dispone la cuenca y al mismo tiempo los más necesarios para sus pobladores; en consecuencia, para que su aprovechamiento resulte eficaz, se les debe considerar en el contexto indicado.

El agua se incorpora a la cuenca a través de las precipitaciones y éstas pueden ser normales, es decir moderadas, o torrenciales. Éstas últimas suponen una abundancia de precipitación en un intervalo de tiempo reducido. A su vez, las precipitaciones torrenciales pueden ser ordinarias o extraordinarias y, en el límite, las últimas se transforman en eventos extremos.

El comportamiento de la cuenca ante las precipitaciones torrenciales extraordinarias o extremas tiene implicaciones más allá del mero funcionamiento en ella del ciclo del agua, pues al tratarse de importantes volúmenes de agua que se ponen en movimiento en un corto intervalo de tiempo, desencadenan el fenómeno conocido como *geo-dinamismo torrencial*, que activa el ciclo de los sedimentos conjuntamente con el recorrido del ciclo del agua por la propia cuenca. Dicho fenómeno se inicia con la erosión del suelo por las precipitaciones y las escorrentías, continúa con el transporte de los sedimentos erosionados por éstas últimas y por los flujos de avenida que se forman en los cauces donde se concentran las escorrentías, y termina con el depósito de los sedimentos incorporados a la corriente, cuando ésta no tiene la capacidad suficiente para seguir transportándolos, lo que genera normalmente conos de sedimentación, si se trata de torrentes o cursos torrenciales; o distintas formas del lecho o deltas aluviales, cuando se trata de ríos de llanura.

En la Figura 1.1 se muestra de un modo sintético los efectos que el geo-dinamismo torrencial causa en las diferentes fases del recorrido de los ciclos del agua y de los sedimentos por la cuenca hidrográfica, desde el momento en el que la precipitación torrencial incide sobre ella e inicia el proceso. Las primeras ordenaciones hidrológico-forestales (H & F) y sus posteriores proyectos de restauración surgen ante las situaciones de emergencia que se presentan de las cuencas, motivadas por la ocurrencia en ellas de eventos torrenciales. Pero, en el transcurso del tiempo, se ha incorporado también el análisis del ciclo del agua en las cuencas vertientes para precipitaciones normales, planteándose de este modo un aprovechamiento más controlado y continuado del recurso agua en las mismas. Esta doble consideración del comportamiento del ciclo del agua en la cuenca vertiente en el transcurso del tiempo, es la que se ha adoptado en el Proyecto EPIC FORCE, tal como se comprobará a lo largo del presente texto, aunque diferenciando claramente las dos situaciones comentadas: 1) la que tiene lugar mientras se desencadenan los procesos torrenciales y 2) la que se desarrolla con precipitaciones normales en el intervalo comprendido entre dos eventos torrenciales consecutivos.

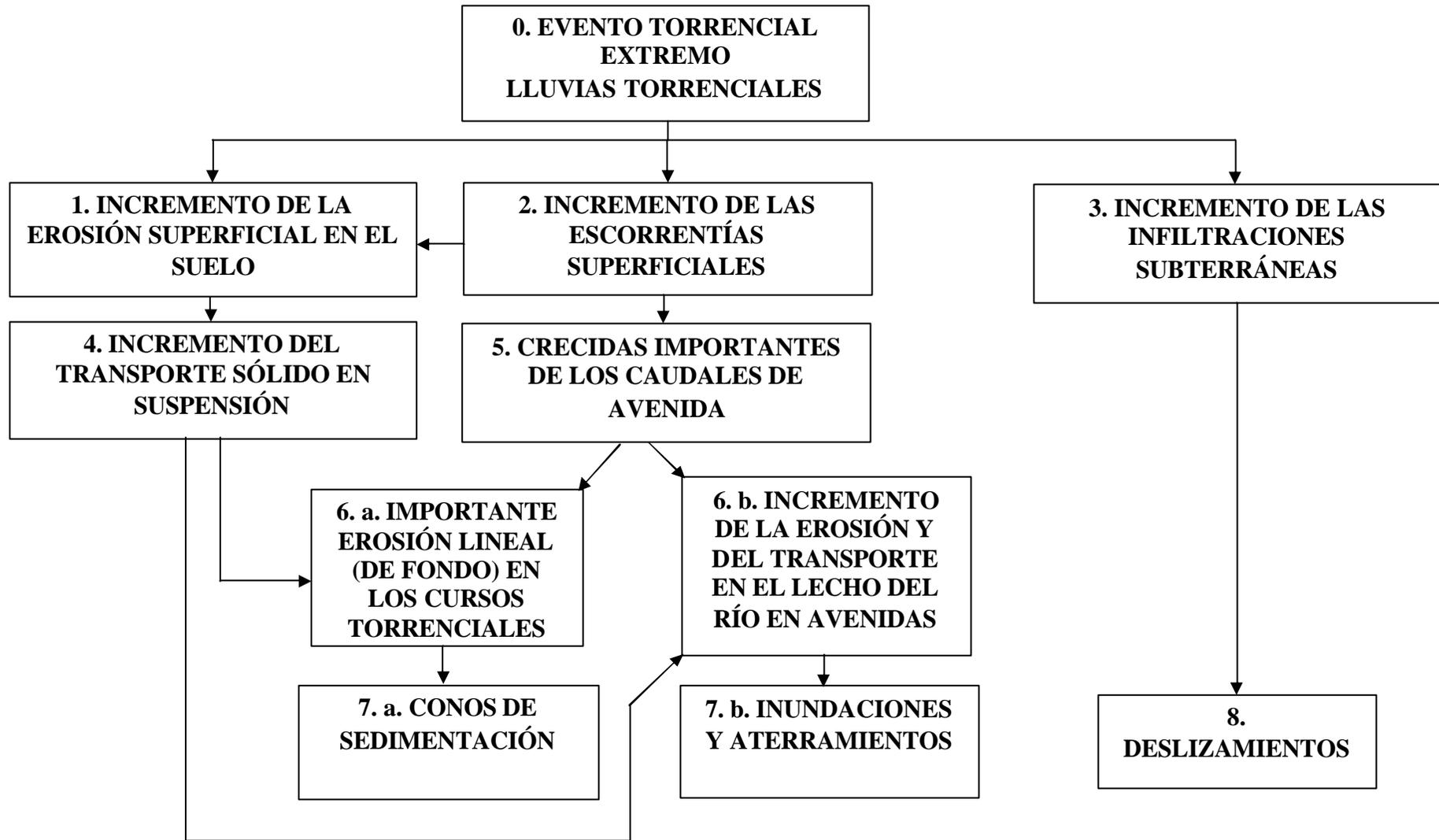


Figura 1.1. - Síntesis del impacto de los eventos extremos en las diferentes áreas de una cuenca hidrográfica

En el plano de los principios, resulta evidente que la solución técnica para conseguir la mejor protección posible para la cuenca hidrográfica ante un evento torrencial extraordinario, se encuentra en una adecuada combinación de medidas hidráulicas de obra civil (encargadas de evacuar el flujo sobrante de la cuenca en esos momentos) y de mantenimiento de unas cubiertas arboladas permanentes en los lugares estratégicos de la cuenca (áreas dominantes de fuertes pendientes), para que el terreno resista en ellos las tracciones generadas por las fuertes escorrentías que tienen lugar en los mismos en los momentos del evento, evitando así la incorporación de un importante caudal sólido al flujo, que añade problemas a la evacuación de la corriente fuera de la cuenca.

Ante las restantes precipitaciones torrenciales, los efectos del bosque y de las demás cubiertas vegetales mecánicamente actúan basándose en los mismos principios y sus efectos pueden resultar incluso más convincentes. La cuestión puede diferir para los periodos que transcurren entre precipitaciones torrenciales, sobre todo cuando éstos se prolongan y en los mismos tampoco se prodigan las lluvias normales, es decir, durante los periodos de sequía. En estos momentos los aspectos fisiológicos de la vegetación pueden estar incidiendo sobre los recursos hídricos de la cuenca vertiente; pero no necesariamente variando las características mecánicas de la vegetación en relación con la protección del suelo, siempre y cuando la vegetación conserve su estructura, tanto aérea como radical. Queda sin embargo por responder la siguiente cuestión ¿Tiene sentido cuestionar las necesidades hídricas de las plantas, en especial del arbolado, cuando se plantea la ordenación y restauración de una cuenca hidrográfica?.

La respuesta, desde el punto de vista de conseguir la mejor protección del suelo en la cuenca y la mayor estabilidad para sus laderas, es evidentemente no; por razones mecánicas. Pero si la cuestión se plantea en el sentido de resolver algunas necesidades para la población que habita en la cuenca, entra en el ámbito de lo discutible. ¿Cuál sería el límite del que no se debería pasar?. Pues evidentemente aquel en el que la cuenca pueda entrar en un proceso de degradación prácticamente irreversible; porque no olvidemos que la vegetación natural de la cuenca es la que le corresponde por su clima; algo que sólo existe en las cuencas vírgenes, pero que en la práctica responde a un concepto fito-climático universalmente aceptado.

En cuanto a los conceptos utilizados a lo largo del texto, se comenta lo siguiente. Se han considerado los inicios en la corrección de los torrentes de montaña en Europa, durante la segunda mitad del siglo XIX, como el origen de las ordenaciones de las cuencas vertientes. Los ingenieros correctores de torrentes de la época se percataron que, para asegurar la efectividad a lo largo del tiempo de las obras hidráulicas de corrección de torrentes que realizaban, se precisaba restaurar las cuencas vertientes a los mismos. De este modo los términos *corrección de torrentes* y *restauración de cuencas de montaña* o simplemente *restauración de montañas* surgen simultáneamente. Como normalmente la restauración de las cuencas de montaña implicaba su repoblación forestal, en España se acuñó la palabra *restauración hidrológico forestal*, cuya acepción se fue ampliando conforme las cuencas vertientes objeto de restauración se extendían a mayores superficies y por tanto sobrepasaban su ámbito primitivo restringido a las montañas.

Se señala que, antes de iniciar la corrección de un torrente y la restauración de su cuenca vertiente, se procedía a los trabajos que se conocían con el nombre de *reconocimientos previos*, que consistían en un estudio del estado físico y de su previsible comportamiento ante los aguaceros del torrente a corregir y de su cuenca vertiente. A estos trabajos se les prestaba

especial atención, hasta el punto que los mismos estaban recogidos en el Reglamento de la Ley de Montes de 1957 (artículo 348) de 22 de febrero de 1962.

Continuando con lo que sucedía en España, al generalizarse el estudio de las cuencas vertientes como unidades de gestión y adoptar para ellas superficies más extensas, la restauración de sus áreas de montaña o dominantes pasa a formar parte de uno de los problemas a resolver dentro la cuenca, pero no el único problema; además su solución no cabe plantearlo al margen del conjunto de la cuenca, sobre la que sigue teniendo una importante repercusión. Por otra parte, los problemas agronómicos que aparecen en las áreas dominadas o valles son en general diferentes a los que surgen en las áreas dominantes, aunque todo lo que ocurra en estos últimos influya sobre ellas; son terrenos más aptos para el cultivo y en ellos el uso racional del agua y del suelo y la conservación de dichos recursos recobra especial protagonismo. Para tener en cuenta todos estos aspectos en la fase inicial de los trabajos de restauración de las áreas forestales de montaña, se planteó en la década de los setenta del siglo pasado la elaboración previa de la *ordenación agro-hidrológica* de las cuencas, que serían posteriormente objeto de proyectos de restauración hidrológico-forestal básicamente en sus áreas dominantes. En la concepción de este planteamiento desempeñaron una labor importante los doctores **López Cadenas de Llano** y **Aguiló Bonnín**, jefes de las secciones de Hidrología y Conservación de Suelos respectivamente del ICONA (Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza – Ministerio de Agricultura).

El principal destinatario de este texto son las cuencas hidrográficas de América Latina. En algunas de ellas el objetivo más importante, en la práctica el único, se centra en la protección de sus áreas dominadas ante los efectos que puedan causarles los eventos torrenciales extraordinarios que incidan sobre las mismas; para tales situaciones la concepción tradicional de la ordenación (o reconocimiento previo) y restauración hidrológico-forestal de la cuenca se adapta plenamente al objetivo planteado. Pero en las restantes cuencas, mucho más numerosas, se debe plantear, sin renunciar el objetivo anterior de proteger sus áreas dominadas, el modo de compatibilizar el aprovechamiento sustentable de sus recursos agua y suelo (tanto en sus áreas dominantes como dominadas) con el mantenimiento de su población; bajo esta concepción la cuestión parece más razonable plantearla a partir de la *ordenación agro-hidrológica de la cuenca*, donde se tenga en cuenta la influencia de todos los tipos y usos del suelo en la misma, pero sin restarle el protagonismo que tiene la vegetación permanente, especialmente las masas arboladas que constituyen los bosques, en el ciclo del agua y de los sedimentos dentro de la cuenca.

Esta *ordenación agro-hidrológica de la cuenca* constituye la fase antecedente, como en el pasado representaban los reconocimientos previos aunque mucho más elaborada, para proyectar a posteriori las actuaciones hidrológico-forestales (corrección de los cursos torrenciales y restauración y creación de las áreas arboladas donde proceda), a fin de conseguir una mayor estabilidad de la cuenca ante los eventos torrenciales que le sobrevengan y para conseguir su mejor comportamiento hidrológico, que en definitiva contribuirá en un mejor aprovechamiento de sus recursos básicos, el agua y el suelo.

1.2. EL ORIGEN DE LAS DIFERENTES CONCEPCIONES DE LA ORDENACIÓN DE CUENCAS VERTIENTES, ANTE LAS NECESIDADES SURGIDAS EN ELLAS EN EL TRANCURSO DE SU HISTORIA RECIENTE.

La ordenación de las cuencas vertientes surge ante la necesidad de resolver en ellas las dos cuestiones básicas siguientes: 1) La de controlar los efectos no deseados que a modo de geodinamismo torrencial le ocasiona el movimiento del agua en su recorrido por la cuenca vertiente, tras la incidencia en ella de aguaceros o precipitaciones torrenciales extraordinarias; 2) La de regular el aprovechamiento del recurso agua en la cuenca en todo momento. Resulta evidente que cualquier forma de regulación del agua en la cuenca vertiente implica connotaciones medioambientales, que no siempre resultan todas ellas positivas, sobre todo si se analizan con los criterios proporcionados por los sofisticados modelos hidrológicos de los que se dispone en la actualidad; pero las ordenaciones de cuencas hidrográficas tienen su propia tradición, que les justifica el que se llevaran a efecto ante las diferentes situaciones de necesidad o emergencia planteadas en ellas en el pasado. En tales ordenaciones se hacía prevalecer una razón sobre las demás; razón que era adoptada tras ser seriamente meditada, analizada y discutida por los técnicos competentes y normalmente asumida también por los poderes públicos. A continuación se presentan tres situaciones relevantes, cada una con su razón u objetivo determinante:

1. En la Europa montañosa meridional de finales del siglo XIX, dicha razón era la protección de las áreas dominadas de la cuenca de los efectos catastróficos causados por los eventos torrenciales o por los aludes provenientes de las áreas dominantes; ya que en las primeras se asentaban las poblaciones y por ellas transcurrían las principales vías de comunicación.
2. En el caso de las regiones cerealistas del centro de los Estados Unidos en la década de los años treinta y cuarenta del siglo pasado, la cuestión determinante se centraba en el mayor aprovechamiento agrícola de sus tierras, tratando de eludir riesgos ante eventos torrenciales, especialmente de los extraordinarios.
3. En cuanto al objetivo de los Cuerpos de Ingenieros Civiles del Estado en el área de la Hidráulica, prácticamente en todos los países y desde los tiempos en los que se inician las primeras obras de infraestructuras públicas de gran alcance, se ha dirigido, dependiendo de las circunstancias, en dos sentidos principales: *a)* en tiempos normales, en la correcta distribución sostenida de las aportaciones de agua de la cuenca entre los diversos usos de la misma; *b)* mientras que ante la ocurrencia de eventos torrenciales catastróficos, se ha encauzado en la reconstrucción de las áreas afectadas, normalmente atendiendo a criterios de ingeniería hidráulica.

Sería injusto negar eficiencia a estos planteamientos; pues los mismos, junto a sus correspondientes acciones para hacer realidad sus proyectos, han diferenciado las regiones más desarrolladas de las menos desarrolladas. Pero sería también injusto no reconocer que tales acciones han exigido en el pasado unas limitaciones en el uso de los recursos naturales al menos para una parte de la población, para asegurarse en el presente los beneficios sostenidos que dispone normalmente todo el colectivo, sin un beneficio específico para los primeros; también han exigido unas inversiones, en las que en mayor o menor grado se han visto implicadas las Administraciones Públicas. Además, la evaluación de las acciones realizadas se efectuaba casi siempre mediante el análisis de Beneficio/Coste; lo que implícitamente suponía asumir que algunos efectos no eran deseables, pero que en su conjunto los beneficios del proyecto superaban los inconvenientes y las inversiones (dinerarias o de privación temporal o definitiva de rentas) se justificaban.

En el presente, la aparición de los modelos hidrológicos ha despertado grandes expectativas de poder conjugar la observancia de las dos necesidades anteriormente comentadas y, a su vez, cubrir también otros objetivos como los relacionados con la conservación de la naturaleza o la biodiversidad. Además, estos dos últimos están directamente relacionados con el área científico-técnica de los impactos ambientales y de las medidas paliativas para controlar los efectos colaterales no deseados, causados en el pasado con algunas infraestructuras o con la alteración de amplias superficies de territorio para su puesta en producción agronómica.

Este reto no hay que desperdiciarlo, pero hay que tomarlo con cautela; porque los modelos tienen dos limitaciones: 1) son modelos, es decir, son una visión de la realidad, no la propia realidad y 2) su interpretación, aún siendo totalmente honesta y rigurosa, no está exenta de desviaciones; porque la experiencia sobre los modelos es algo que se está adquiriendo con el paso del tiempo, día a día, pero aún está lejos de ser tan directa y eficiente como el de unos planos técnicos o unos informes analíticos; justamente porque los modelos admiten una lectura mucho más extensa de los fenómenos. Los modelos se afianzan con el tiempo y en el caso de los que se aplican a masas arboladas necesitan especialmente mucho tiempo. Lo dicho no les invalida, todo lo contrario, de algunos modelos (los más sencillos) se conocen sus márgenes de aplicación y respecto de aquellos que no se conocen, se puede llegar y se llegará a conocerlos.

En los trabajos de ordenación de cuencas es muy conveniente tener presente, tanto las experiencias del pasado en otras cuencas, como la realidad actual de las cuencas a ordenar; así como también actuar con la prudencia que exigen las acciones cuyos resultados sólo podrán ser comprobados a largo plazo. Como ejemplo de lo que se comenta, se menciona que algunas masas arboladas, como la puebla el Parque Natural de Sierra de Espuña en la provincia de Murcia (España), son el resultado de una ordenación y restauración hidrológico-forestal planteada y comenzada a ejecutar al final del siglo XIX y principios del siglo pasado.

1.3. ACTUACIONES HIDROLÓGICO-FORESTALES EN CUENCAS VERTIENTES QUE PRESENTAN DISTINTOS ESCENARIOS NATURALES (ESTADO DEL ARTE)

Atendiendo a los efectos causados por el geo-dinamismo torrencial que se muestran en los diferentes cuadros numerados que aparecen en la Figura 1.1, las estrategias restauradoras o correctoras para cada una de las situaciones planteadas en los mismos, pueden sintetizarse de manera genérica por las actuaciones siguientes

- a. En relación con los efectos consignados en los cuadros **1, 2 y 4**, éstos se pueden mitigar actuando sobre la cuenca vertiente con repoblaciones forestales, control del pastoreo, pequeñas obras hidráulicas de control de la escorrentía superficial, medidas de conservación de suelos y prácticas de laboreo racional; dependiendo según las situaciones de las pendientes del terreno, de la posición altimétrica de las zonas afectadas y de las circunstancias concretas del lugar en cuestión.
- b. Respecto de los efectos del cuadro **5**, la forma más radical de controlarlos es mediante embalses de regulación. Es un procedimiento caro, complejo, con fuertes impactos sobre el territorio y no exento de ciertos riesgos; pero es una medida que ha sido

adoptada en determinadas circunstancias en países con tecnología avanzada y con recursos para realizarlo. Frente a ella las restantes medidas pueden considerarse alternativas o complementarias y consisten en:

- Proteger los márgenes del cauce en las secciones que corresponden a las zonas más pobladas o presenten cultivos de mayor valor económico o estratégico y dejar expandir a la corriente en las despobladas e improductivas, donde causen menos daños. Cuando los ríos son muy torrenciales estas medidas se deben completar con umbrales de fondo.
 - Como medida pasiva que afecta a la población, están los sistemas de alerta y evacuación.
- c. En cuanto a los efectos del cuadro **6.a**, éstos se mitigan actuando en los cauces con técnicas de corrección de torrentes. Estas técnicas se extienden también al cuadro **7.a**.
- Como medida pasiva que afecta a la población, están los sistemas de alerta y evacuación.
- d. En relación con los efectos del cuadro **6.b**, éstos se reducen con obras hidráulicas de protección de márgenes (escolleras, malecones, espigones, vegetación de riberas, la combinación de varias de ellas, etc.) Estas medidas trasladan el problema hasta la situación del apartado **7.b**, donde la única solución es buscar una salida para que el agua no se embalse. En ocasiones esta salida es difícil de encontrar, pero en todos los casos hay que evitar trabas y permitir que el agua circule hasta un cauce de mayor rango o directamente al mar.
- Es posible estimar, a través de modelos hidrológicos e hidráulicos y técnicas cartográficas de representación en el territorio, los límites previsibles del área de inundación.
 - Como medida pasiva que afecta a la población, están los sistemas de alerta y evacuación.
- e. En relación con los efectos consignados en los apartados **3.** y **8.**, sólo se pueden abordar cuando se conocen las infiltraciones aguas arriba del área de deslizamiento, utilizando técnicas de desviación del flujo de filtración. Si el evento torrencial dura mucho tiempo, resulta imposible de impedir el deslizamiento. Se podría realizar una primera estimación del tiempo que puede mantenerse la ladera sin deslizarse, pero la medida resulta muy imprecisa. En Europa hay situaciones en las que se ha desmontado la ladera cuando afecta a poblaciones en la zona dominada. Lo mejor es no asentar las poblaciones donde exista este riesgo.
- La utilización de los sistemas de alerta y evacuación de la población, no son suficientes en estos casos. La protección se debe asegurar de forma permanente.
 - Hay deslizamientos imposibles de prever, porque las filtraciones se realizan por primera vez en el lugar con ocasión del evento extraordinario. Cuando son epiteliales (superficiales), aunque resulten muy aparentes, no son graves y se cicatrizan con el tiempo. Si son en profundidad o rotacionales, mucho más raros, son casi imposibles de prever y corregir; sólo se puede actuar en ellos ante un segundo deslizamiento tras producirse el primero.

Pero ante todo conviene señalar que las diferentes actuaciones en las cuencas hidrográficas objeto de ordenación y restauración hidrológico-forestal, no se pueden sustraer de las características y del estado físico que éstas presentan. En la matriz de la Tabla 1.1 se definen cuatro escenarios, atendiendo a los aspectos físicos de la cuenca vertiente, en los que proponer las actuaciones pertinentes.

Pendiente	Altitud	I. Áreas dominantes de la cuenca (cabeceras)	II. Áreas dominadas de la cuenca (valles)
A. Predominio de laderas con pendientes elevadas o incluso escarpadas. Pendiente media de la cuenca superior al 20 %		Escenario I.-A	Escenario II. A
B. Abundancia de laderas con pendientes de suaves a moderadas. Pendiente media de la cuenca inferior al 20 %.		Escenario I.-B	Escenario II.-B

Tabla 1.1. Distintos escenarios naturales en una cuenca hidrográfica ante su ordenación y restauración hidrológico-forestal.

En cada uno de los cuatro escenarios surgidos de la matriz anterior, se ha distinguido si su altitud supera o no determinados valores, con el fin de atender a los siguientes aspectos.

- a. La presencia del bosque, que en las diferentes latitudes está condicionado por la altitud (timber line).
- b. El riesgo de desprendimientos de aludes.
- c. Las diferencias específicas dentro de los escenarios iniciales, debidas al impacto de la altitud en los mismos; especialmente en los casos de los torrentes o cursos torrenciales.

La Tabla 1.2, desarrolla la anterior y define en cada uno de los escenarios naturales las diferentes problemáticas que se presentan y los comportamientos a adoptar ante su ordenación y restauración hidrológico-forestal. En la misma se duplica el número de escenarios atendiendo a las posibilidades de la vegetación arbolada de intervenir en el sistema corrector de la cuenca y en cada nuevo escenario se abordan los siguientes aspectos:

1. Una somera descripción física del mismo.
2. Una breve descripción de la fenomenología geo-torrencial que puede afectar al escenario.
3. El esquema corrector para el escenario en cuestión, para el supuesto que el fenómeno geo-torrencial se desencadene, considerando tanto los criterios y objetivos de la corrección, como las propias técnicas utilizadas para tal fin.

Dentro de las técnicas se han diferenciado las que se refieren a:

- a. Los torrentes o cursos torrenciales
- b. La defensa ante el riesgo de aludes
- c. La corrección de las laderas vertientes en la cuenca hidrográfica
- d. El sistema corrector de los deslizamientos del terreno y
- e. La ordenación de los usos del suelo en función de las pendientes del terreno y de su posición altimétrica.

Altitud Pendiente		I. Áreas dominantes o de cabecera de la cuenca		II Áreas dominadas o valles de la cuenca.	
		I.1. Altitudes en el entorno o superiores al <i>timber line</i> .	I.2. Altitudes inferiores al <i>timber line</i> .	II.1 Altitudes elevadas	II.2 Altitudes moderadas o bajas
A	Laderas con pendientes elevadas o escarpadas Pendiente media de la cuenca superior al 20 %.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Áreas de alta montaña cuyo relieve acentúa en los torrentes su carácter geotorrencial ante aguaceros extraordinarios. 2. El geo-dinamismo torrencial puede ser muy intenso. 3. Elevada probabilidad de desprendimientos de aludes. 4. El uso del bosque como elemento restaurador limitado por las condiciones climáticas. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Áreas que por su relieve se acentúan en los torrentes su carácter geotorrencial ante los aguaceros extraordinarios. 2. El geo-dinamismo torrencial puede ser muy intenso. 3. El riesgo de aludes se reduce, por la mayor presencia del bosque. 4. El uso del bosque como elemento restaurador se intensifica, al no existir limitaciones climáticas. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se trata de las típicas zonas ocupadas por los conos de sedimentación de los torrentes de montaña 2. Los problemas geotorrenciales pueden ser muy serios por la divagación de la corriente del torrente. 3. No es probable el desprendimiento de aludes, pero sí que se trate de su área de recepción. 4. Las técnicas de corrección de torrentes deben atender la topografía del terreno 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se pueden asumir los apartados 1, 2 y 4 de la situación II.1.A.; pero son menos probables los problemas geotorrenciales, salvo en los casos de actuaciones desacertadas en los cauces. 2. Al margen de la corrección de los cursos torrenciales, se pueden presentar problemas de conservación de suelos en pastizales y cultivos a causa de las pendientes del terreno.
B	Laderas con pendientes de suaves a moderadas Pendiente media de la cuenca inferior al 20 %.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Áreas de alta montaña cuyo relieve no acentúan en los torrentes su carácter geotorrencial ante aguaceros extraordinarios 2. Geo-dinamismo torrencial es menos intenso que en la situación I.1.A 3. El riesgo de aludes se reduce respecto al escenario I.1.A. 4. El uso del bosque como elemento restaurador limitado por las condiciones climáticas. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Áreas que en principio no presentan una situación propicia para el desencadenamiento del fenómeno del geodinamismo torrencial, condicionado sólo por las precipitaciones extraordinarias 2. Se dan las condiciones idóneas para el uso de la vegetación con fines correctores, salvo que existan problemas edáficos. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Los problemas geotorrenciales están condicionados a las precipitaciones extraordinarias y a la vulnerabilidad del suelo ante la erosión hídrica. 2. En los cauces se pueden presentar problemas por inundaciones y aterramientos. 3. La principal preocupación en estas áreas se centra en la conservación del suelo en pastizales y cultivos. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se presentan similares características que en la situación II.1.B 2. En los cauces los problemas podrían surgir por inundaciones y aterramientos a causa del escaso relieve del área en cuestión. 3. En las laderas, que son apropiadas para los cultivos, se podrían presentar problemas de conservación de suelos si no se toman medidas apropiadas.

Tabla 1.2. Problemáticas existentes y comportamientos a adoptar para la ordenación y restauración hidrológico-forestal en los diferentes escenarios de una cuenca hidrográfica.

1.3.1. Análisis del escenario I.1.-A

1.3.1.1. Descripción

Áreas de alta montaña con laderas de fuertes pendientes. Si además la litología del lugar presenta materiales erosionables o deslizantes, los torrentes del presente escenario acentúan su carácter geo-torrencial ante precipitaciones extraordinarias, especialmente ante eventos extremos.

Como la vegetación arbórea no sobrepasa de una determinada cota del terreno por razones fito-ecológicas, una porción del área en cuestión, la situada en mayores altitudes, queda cubierta por otros estratos vegetales (matorrales o pastos de altura), o con el terreno prácticamente desnudo (riscos, parajes rocosos, etc.).

1.3.1.2. Fenomenología geo-torrencial

La dinámica geo-torrencial puede llegar a ser muy intensa, sobre todo si se da la doble circunstancia de precipitaciones extraordinarias y terrenos de materiales deleznable, pudiéndose generar corrientes saturadas de sedimentos, normalmente como flujo bifásico, aunque ocasionalmente se den también como monofásico; pero en cualquier caso la descarga sólida resulta muy elevada y dentro de ésta el caudal sólido de fondo (*bed load*) representa un porcentaje importante.

Además, en los terrenos con pendientes superiores al 60 % se pueden desprender aludes, lo que agrava la situación de peligro en el invierno.

1.3.1.3. Esquema corrector

Criterios y objetivos de la corrección

Corrección de torrentes, que obviamente se realiza cuando hay algún interés que proteger, su objetivo es tratar de alcanzar la *pendiente de compensación* o de equilibrio del torrente para un caudal *generador del lecho* previamente establecido, con el fin de conseguir la estabilidad del sistema de drenaje. Con ello se pretende dar respuesta a la cuestión: ¿Qué se puede hacer con la corriente y en donde se pueden depositar los sedimentos, para que ninguno de ellos ocasione ni problemas ni daños?. En el presente escenario los dos problemas principales que se pueden presentar son los siguientes:

1. La necesidad de una rápida evacuación de la corriente con arrastres del torrente por el tramo objeto de la corrección, para que no peligren sus zonas limítrofes ni por las inundaciones y ni por los depósitos de sedimentos.
2. La estabilización del curso torrencial; tanto de su lecho (consolidándolo y evitando su erosión remontante), como en ocasiones también de sus márgenes (para que no se derrumben sobre el propio cauce).

El sistema corrector puede disponer de un único dique a modo de *dique de cierre transversal al cauce del torrente*, si las características del paraje y en especial las del emplazamiento lo permiten; pero lo más frecuente es que se componga de varios *diques transversales al cauce del torrente a modo de escalera*, estableciéndose entre diques consecutivos la pendiente de

compensación o de equilibrio del torrente; de modo que donde termina la pendiente de compensación del dique de aguas abajo, se plante el dique de aguas arriba. La formación de la pendiente en cuestión depende de los eventos torrenciales y de la naturaleza y granulometría de los sedimentos del lecho; su incidencia en las condiciones del régimen de la corriente no está muy condicionada por el tipo de diques utilizados en la corrección, aunque es evidente que éstos influyen en la granulometría del lecho.

Un aspecto muy importante en el sistema corrector de un torrente es el seguimiento de su evolución tras las diferentes avenidas, lo que permite ir conociendo su dinámica, efectuar las correcciones oportunas a las actuaciones realizadas en los mismos y prever las futuras actuaciones con criterios más sólidos justificados en los hechos, por tanto, en la experiencia.

Sistema de protección contra los aludes, previamente se requiere disponer de una cartografía de identificación de los aludes o al menos tener el conocimiento de su existencia, a continuación se plantea el siguiente análisis: Si los aludes no afectan a ningún interés que proteger (núcleos de población, comunicaciones, casas o refugios aislados, etc.), no es necesaria ninguna actuación por el momento. Por el contrario, si afectan, las alternativas más razonables para en el escenario en cuestión son:

1. Tratar de retener el manto de nieve allí donde se pueda desencadenar el alud.
2. Defenderse del alud desviando su recorrido
3. En situaciones muy específicas, también se frena el alud al final de su recorrido (aunque este aspecto se corresponda más bien con el escenario II.1.A.)

Corrección de las vertientes de la cuenca hidrográfica, se trata de aprovechar el potencial de la vegetación en este escenario, tanto en lo relativo a la protección del suelo frente a la erosión, como en su capacidad de impedir el desprendimiento de aludes, a sabiendas de las limitaciones que tiene el bosque para su expansión en el mismo, a causa del reducido periodo vegetativo que en él se le presenta y de su incapacidad de vegetar por encima de determinadas altitudes.

Sistemas de corrección de los deslizamientos del terreno, ante los mismos cabe plantearse la misma disyuntiva que la establecida al comentar el sistema contra los aludes. Si el deslizamiento no afecta a ningún interés que proteger, no resulta necesario actuar de momento. En caso contrario, si les afecta, la solución radica en conseguir un doble efecto: por un lado, reducir la llegada del agua a la zona del deslizamiento (bien sea superficialmente o como flujo subterráneo), así como drenar la superficie deslizante; por otro, disminuir la pendiente de la superficie deslizante hasta alcanzar una pendiente estable.

Técnicas utilizadas en la corrección:

Corrección de torrentes

Para conseguir una rápida evacuación de la corriente con arrastres por el tramo objeto de la corrección, la tendencia actual es la utilización de *diques rastrillos*, transversales al cauce del torrente, que retengan los arrastres, dejando pasar aguas abajo los sedimentos más finos a fin de prolongar la vida útil de la obra. Normalmente se trata de *diques de gravedad* en hormigón en masa o armado. En la actualidad lo más habitual son *diques de hormigón armado con grandes vertederos*, que en ocasiones pueden adoptar la forma de dos muros de hormigón enfrentados, cuya abertura central se cierra únicamente con vigas transversales a modo de

rastrillos empotradas en ambos muros, que retienen únicamente los materiales más gruesos; además, la separación de las vigas se puede graduar conforme se eleva el calado de la corriente.

Para estabilizar las laderas deslizantes de los márgenes de algunos torrentes, así como para evitar la erosión remontante en sus lechos y conseguir sus pendientes de compensación, se emplean los *diques de consolidación*, transversales al cauce del torrente. Se trata de *diques de gravedad clásicos*, cerrados y con su vertedero dispuesto en la coronación de la obra y sin más aberturas que los mechinales. Normalmente se construyen en hormigón armado, aunque tradicionalmente se han construido con mampostería hidráulica u hormigón en masa. Cuando los mismos adquieren dimensiones importantes (una altura ≥ 6 m, lo que supone que la corriente aguas abajo del dique adquiera un número de Froude $F \geq 4,5$), se les debe proteger a pié de obra con *disipadores de energía* (colchones de agua o contradiques), que fuercen al flujo evacuado por el vertedero de la obra a experimentar el efecto de un resalto hidráulico, para de este modo perder parte de su energía cinética.

Cuando exista peligro de que los rastrillos o el vertedero (según el tipo de dique) puedan ser taponados por los arrastres leñosos; se debe disponer aguas arriba del dique de redes de acero normalmente de amplias mallas para retenerlos; o si el vaso de sedimentación es lo suficientemente amplio, se pueden situar dentro del mismo elementos que los retengan, que al mismo tiempo pueden obligar a la corriente a circundar el vaso antes de dirigirse al vertedero.

Salvo que se presenten laderas que deslizan sobre el propio torrente y sea preciso sujetarlas con diques de consolidación; los diques rastrillo resultan muy efectivos para conducir la corriente con arrastres del torrente aguas abajo, sin que se desborde ni se retenga, hasta confluir en otro curso de mayor caudal y con suficiente capacidad de transporte, que absorba toda la descarga líquida y sólida del torrente y lo evacue con su propia corriente aguas abajo.

Cuando el curso torrencial pasa por una población de montaña, se le debe encauzar en el tramo que lo atraviesa, previa redacción de un proyecto detallado para la resolución del problema en la situación realmente planteada; además se deben establecer áreas de protección o de resguardo a ambos lados del encauzamiento, en los que quede prohibido cualquier tipo de construcción habitable. En todo el escenario que se contempla en este apartado I.1.-A, pero de un modo especial en el que se refiere a este párrafo, la naturalización de las obras pasa a un plano totalmente secundario, siendo la seguridad la primera y máxima prioridad; lo que no es óbice para que en ocasiones se hayan conseguido naturalizaciones muy ajustadas al entorno.

Sistemas de defensa contra los aludes

Para retener el manto de nieve allí donde se pueda desencadenar el alud, se emplean sistemas formados por hileras de *rastrillos*, *parrillas* o *redes anti-aludes*. En los últimos años se ha extendido el uso de las redes, por su menor peso y mayor flexibilidad y adaptabilidad a las pequeñas perturbaciones que pueda sufrir el sistema, ante ligeros movimientos del manto de nieve.

Para defenderse de los aludes desviando sus recorridos se utilizan *cuñas* y *espigones*, que aunque no impiden su desprendimiento, pueden evitar sus daños. Otro sistema utilizado consiste en las *cortinas anti-viento*, cuya misión es impedir la acumulación de la nieve en los lugares de riesgo de aludes.

En ocasiones muy específicas, para detener el alud al final de su recorrido se emplean grandes *muros de tierra*, que a veces se complementan con rastrillos instalados en su coronación.

Lo habitual ante una zona amenazada por aludes es plantear una *estrategia de corrección*, utilizando una combinación de los diferentes elementos contra los aludes; tras un análisis que incluya: *a)* las características físicas del lugar y el peligro potencial de caída de aludes en el mismo y *b)* los objetivos que se pretenden defender y la información y experiencia de los aludes anteriores habidos en el mismo lugar.

Corrección de las laderas de la cuenca hidrográfica

Si existe el bosque bien sea natural o procedente de antigua repoblación en este escenario, conocidas sus limitaciones para su expansión en el mismo, resulta conveniente mantenerlo; pues, además de proteger al suelo, es el mejor sistema para evitar el desencadenamiento de aludes. Normalmente la persistencia del bosque en estas altitudes implica su ordenación por el método de *entresaca*, que supone quitar los árboles muertos o debilitados y un número limitado de pies sanos, para dejar espacios que aseguren su regeneración.

Si no existe el bosque y es posible su introducción, se debe plantear realizarlo mediante la *replantación* hasta donde sea viable, dado el gran valor del bosque en estas altitudes como protector del sistema hidrológico de toda la cuenca.

Los trabajos de repoblación (preparación previa del suelo y plantación) resultan complejos. La preparación del suelo, que debido a las pendientes del terreno lo normal es que sea puntual, se puede realizar mediante ahoyado manual mecanizado o utilizando para el ahoyado una retroexcavadora araña (ambas sustituyen el antiguo ahoyado manual). Para la plantación, las características del terreno pueden condicionar su ejecución manual. En cuanto a la elección de las especies, éstas vienen condicionadas por su capacidad de atemperarse al medio físico en el que se implantan. Normalmente se limita a un número reducido de géneros (*Larix*, *Abies*, *Picea* o *Pinus* en Europa y Asia; *Nothofagus*, *Pinus*, etc. en América).

El matorral de altura defiende al suelo de la erosión hídrica, pero no es el mejor estrato para sujetar el manto de nieve, porque la nieve establecida entre su entramado no resulta estable. La experiencia en los Alpes europeos ha demostrado que, a falta de bosque, la mejor estructura vegetal para impedir el desencadenamiento de aludes es un pastizal de montaña aprovechado (a diente o a siega), en el que las hierbas no se curven ante la primera nevada.

Entre los trabajos de *replantación* de las laderas de la cuenca y las obras de *corrección en los propios torrentes*, se encuadran los trabajos de control de barranqueras y regatos ubicados en las vertientes directas a los torrentes, incidiendo más o menos perpendicularmente a los mismos. Éstos han consistido tradicionalmente en *faginadas* o *palizadas*, que son pequeños diques de madera, en ocasiones viva (pues se utilizan esquejes de plantas de los géneros *Salix* o *Alnus* que pueden enraizar en el terreno), transversales a las barranqueras y regatos, cuya misión es sujetar las laderas, evitando la erosión superficial en las mismas y regenerando en ellas el tapiz vegetal. Asimismo en áreas de alta montaña, donde interesa disminuir la pendiente del terreno para evitar desprendimientos y conseguir estabilizar la vegetación en las laderas de aguas abajo, se construían en el pasado *albarradas*, que consisten en pequeños muros de piedra en seco, de altura normalmente inferior a 2 m, contruidos siguiendo las curvas de nivel del terreno. Las albarradas se han utilizado también a modo de pequeños diques transversales con rebosadero incluido, para sistematizar pequeños barrancos

incipientes. Cuando el vaso situado aguas arriba de la albarrada se aterraba, se implantaba en el mismo un cultivo arbóreo y de este modo se trataba de recuperar la ladera. Las faginadas o palizadas necesitan de cierta humedad de terreno para que los esquejes puedan enraizar; mientras que las albarradas se han implantado sobre todo en climas semiáridos. Una variación de las albarradas son los *balates* o *andes*, que por su estructura y aplicación se pueden identificar con los *bancales de talud de piedras*, utilizados en la agricultura de las áreas de montaña para poder conservar el suelo cultivado. Se emplearon en la América precolombina y de ahí parece provenir el nombre de Cordillera de los Andes.

Sistema corrector de los deslizamientos del terreno

Lo normal, en el escenario que se comenta, es que se trate de deslizamientos locales, en ocasiones importantes, siendo los trabajos de corrección bastante complejos.

Existe una técnica utilizada en los Alpes italianos (Veneto, Trentino, Bolzano) y austriacos (Tirol) que resulta muy efectivo si los deslizamientos no alcanzan grandes dimensiones. Consiste en una reconstrucción de la zona deslizada, a partir en una estructura de troncos de madera colocados en filas alternas longitudinales y transversales, que recompone la ladera deslizada adoptando para ésta una pendiente previamente calculada, que le permita mantenerse en equilibrio soportando el peso de la estructura; actuación que se complementa con un drenaje interno del área corregida, para evacuar el agua que llega a la misma y, por supuesto, la propia estructura debido a sus características constructivas dispone de drenaje en su superficie. La estructura completa de corrección del deslizamiento admite ser naturalizada, implantando en su exterior especies vegetales de alta transpiración como las del género *Salix*; que, por otro lado, dado su rápido crecimiento, precisan de un riguroso control de su desarrollo, para que no sobrepasen de peso y puedan perjudicar a la estabilidad de la obra; aunque la solución es muy sencilla, basta con podar oportunamente dicha vegetación.

Tratándose de grandes deslizamientos, su solución pasa por apartarse de ellos; solo en casos extraordinarios puede tener sentido su desmonte, pero esto no es lo normal en este escenario.

1.3.2. Análisis del escenario I.2.-A

1.3.2.1. Descripción

Se puede describir en los mismos términos que el escenario anterior I.1.-A; pero en este caso se trata de un área de montaña, en el que es más difícil que se presenten desprendimientos de aludes, salvo que se trate de latitudes muy elevadas. Además la vegetación arbórea puede ocupar cualquier cota en el terreno, siempre que disponga de perfil edáfico suficiente; lo que confiere a la cubierta vegetal un papel muy especial en la configuración el sistema corrector del área en cuestión.

1.3.2.2. Fenomenología geo-torrencial

Es similar al del escenario I.1.-A y esencialmente se puede definir con los mismos términos. La dinámica geo-torrencial puede adquirir una gran intensidad y la carga sólida transportada por la corriente en los momentos de máximas avenidas alcanzar valores muy elevados. Sin embargo, para cuencas de igual superficie, lo previsible es que la descarga de acarreo sea menor en este escenario que en el I.1.-A; aunque ante eventos extraordinarios las previsiones no siempre resultan acertadas.

1.3.2.3. Esquema corrector

Criterios y objetivos de la corrección

Corrección de cursos torrenciales, los criterios y las estrategias establecidas en el escenario I.1.-A para asegurar la estabilidad de los torrentes, son también de aplicación para el presente I.2.-A; pero en éste, a los dos problemas principales definidos en aquel, se añade un tercero:

- 3 Conseguir que los sedimentos no lleguen a determinados emplazamientos, por ejemplo, al vaso de un embalse, lo que exige retenernos aguas arriba de uno o varios diques construidos al efecto, que reciben el nombre de *diques de retención*.

Corrección de las vertientes de la cuenca hidrográfica, estos trabajos desempeñan un papel fundamental en el sistema corrector de este escenario, caracterizado por laderas de fuertes pendientes y por la ausencia de limitaciones importantes en cuanto a la duración de su periodo vegetativo, lo que hace del mismo el prototipo para destinarlo al bosque, sea autóctono o procedente de repoblación. Ante tal situación, se plantean las dos opciones siguientes:

- 1 Si existe el bosque autóctono o de repoblación en proporciones adecuadas para la cuenca en cuestión y éste se ubica en las posiciones estratégicamente convenientes (cabeceras de cuenca, zonas de mayores pendientes y en los márgenes de sus principales cursos de agua), lo conveniente es conservarlo, tomando para ello las medidas pertinentes. Desde el punto de vista hidrológico no existe impedimento para que dichas formaciones se aprovechen, mientras se garantice su persistencia y el porte (o estructura) original de la vegetación.
- 2 Cuando no existen las cubiertas arboladas pertinentes (sobre todo en las áreas definidas como estratégicas), la solución pasa por implantarlas, si las condiciones edáficas lo permiten y sobre todo si en dichas áreas se presentan problemas erosivos importantes, acudiendo a los correspondientes trabajos de repoblación si resulta preciso.

Sistemas de corrección de los deslizamientos del terreno, en lo que a ellos afecta, se refiere a lo comentado para el escenario I.1.A.

Técnicas utilizadas en la corrección

Corrección de torrentes

Para cada uno de los tres problemas planteados en este escenario: 1) *la rápida evacuación de los sedimentos del tramo objeto de corrección*, 2) *la estabilización de las laderas y del lecho del torrente* y 3) *la retención de sedimentos*, existen distintas soluciones estructurales dependiendo de las circunstancias de cada curso torrencial, que se miden tanto por sus parámetros hidráulicos convencionales, como por el tipo de sedimentos que le llegan desde su cuenca vertiente y la naturaleza y granulometría de los materiales de su propio lecho.

En el caso de los *diques filtrantes*, además del definido en el escenario I.1.-A, se mencionan las siguientes modalidades: *diques de fábrica celular con armazón de vigas entrelazadas*; *diques de bloques de hormigón prefabricados*; *diques de elementos metálicos prefabricados*; *diques reticulares* y *diques de enrejado*, cada uno adaptable a la situación específica a corregir o al lugar concreto para el que se ha proyectado dentro de la planificación global del sistema corrector.

Para las situaciones en las que el problema a corregir consiste en la estabilización del lecho y o de los márgenes de un curso torrencial, se utilizan los *diques de consolidación*, cuyas especificaciones se han definido al comentarlos dentro del escenario anterior I.1.-A, por lo que se remite a lo expuesto en el mismo.

En cuanto a los *diques de retención*, se construyen transversales al cauce del curso torrencial, normalmente como diques de gravedad, con mampostería hidráulica u hormigón en masa, son cerrados sin más aberturas que las de los mechinales y con su vertedero dispuesto en la coronación de la obra. También se construyen con *mampostería de gaviones*, sobre todo en cursos de laderas poco consolidadas, para aprovechar que la porosidad inicial de la fábrica evite la socavación lateral del cauce, motivo por el que su uso se ha extendido con profusión en todas las latitudes; pero tales diques requieren de un buen diseño y una construcción muy bien acabada, porque en los emplazamientos en los que habitualmente se les sitúan, pueden sufrir problemas de filtraciones que acaben por arruinar la obra. Si se utiliza la mampostería de gaviones, no hay razón para no emplear también otros tipos de estructuras como los diques reticulares; e incluso en el pasado se han construido, en emplazamientos muy específicos en roca no alterada, diques en bóveda; pero se trata de casos poco habituales.

La vegetación de ribera en los márgenes de los cursos torrenciales, en ocasiones constituye una auténtica medida de corrección por sí misma ante situaciones específicas (como las que se comentan más adelante, en su correspondiente apartado, en relación con los cursos que drenan en la cuenca del río Pejibaye en Costa Rica); pero como norma general su acción refuerza el efecto de las obras hidráulicas transversales al cauce, que se efectúan para controlar la dinámica torrencial del curso a corregir.

La naturalización morfológica de los trabajos y obras de corrección de torrentes, combina elementos tanto de la línea clásica de corrección de torrentes como de las nuevas técnicas de ingeniería paisajística. Su utilización está extendida por las regiones del norte de Italia (Veneto, Trentino, Alto Adige), oeste de Austria (Tirol) y sur de Alemania (Baviera). Su

objetivo es recomponer la estructura original de los torrentes de montaña, sin alterar la seguridad que le aportan las estructuras tradicionales de ingeniería hidráulica, pero añadiendo una mejor reconstrucción morfológica de los cursos de agua y una mayor integración de los mismos al paisaje alpino.

Corrección de las vertientes de la cuenca hidrográfica

La utilización de la cubierta vegetal desempeña un papel fundamental en el sistema corrector de este escenario. Siguiendo con lo tratado al respecto en el escenario anterior I.1.A, si existe el bosque natural o de repoblación en las proporciones adecuadas para la cuenca en cuestión y éste se ubica en las debidas posiciones estratégicas de la cuenca, dicho bosque se debe mantener; en caso contrario la solución pasa por instalarlo si las condiciones edáficas lo permiten, sobre todo cuando el estado de erosión en las laderas vertientes lo demanda, realizando trabajos de *replantación forestal*. Éstos implican las operaciones siguientes:

1. *Elección de especie*, se trata de un aspecto esencialmente silvícola y su objetivo es que la especie elegida se atempere al medio en el que se pretende introducir.
2. *Preparación del suelo*, tiene un carácter edáfico-hidrológico y con el mismo se pretende satisfacer las condiciones hídricas de las plantas en los dos años siguientes a su plantación.
3. *Plantación*, es el aspecto aparentemente más mecánico, pero no por ello menos importante; porque debe atender también al reconocimiento de la planta (su procedencia, edad y estado biológico, estructural y sanitario); así como a la correcta operación de instalación de la planta en el terreno y su seguimiento en los dos años siguientes a la plantación con operaciones de binas y escardas, para asegurar el futuro de la repoblación.

Se describen los trabajos de repoblación porque, cuando se trata de parajes situados en latitudes con clima templado o templado frío como ocurre en Europa, los mismos son necesarios para conseguir la formación de masas arboladas en laderas desnudas, con síntomas de erosión hídrica acelerada y necesitadas por tanto de protección.

Sin embargo, en zonas tropicales que siguen manteniendo su capacidad biológica para regenerar un bosque secundario a partir de los terrenos ocupados por pastizales o dedicados al cultivo, sin otra operación que abandonar dichas prácticas para que el bosque vuelva a invadir los terrenos, esta simple acción puede representar desde el punto de vista hidrológico una actuación equivalente a los trabajos de repoblación forestal con fines hidrológicos, donde la naturaleza realiza las tres labores anteriormente descritas: elección de especies, preparación del suelo y la propia plantación, todo ello plenamente atemperado con el medio externo. La cuestión esencial es que los terrenos mantengan su capacidad de regeneración.

En las áreas objeto de este escenario, no contemplados dentro de las zonas tropicales, se pueden aplicar diferentes labores de preparación del suelo, dependiendo de las pendientes del terreno a repoblar. En pendientes elevadas, superiores al 40 %, se debe recurrir al ahoyado manual mecanizado o al ahoyado mediante retroexcavadora araña. En pendientes más moderadas pero superiores al 30 %, se puede realizar el ahoyado mediante una retroexcavadora convencional; pero también se pueden efectuar preparaciones del suelo a base de subsolados lineales o cruzados. Finalmente para pendientes que no rebasen el 30 % lo habitual es recurrir también a una preparación lineal; en el sur de España ha sido muy habitual realizar un acaballonado con arado forestal bisurco o en su defecto un decapado y posterior subsolado con bulldozer.

La plantación sería manual para las pendientes más elevadas y sólo por debajo del 30 % de pendiente puede resultar rentable mecanizarla.

Comentar la elección especie en un escenario como el que aquí se plantea resulta inabordable; pues depende de las condiciones climáticas y edáficas de las estaciones en las que se lleve a cabo la repoblación, por tanto, rebasa los objetivos de este documento

La cuestión de la ordenación de los usos del suelo en función de la pendiente del terreno

Las superficies identificadas con el presente escenario, al tratarse en general de terrenos de pendientes elevadas, su destino natural resulta el arbolado o en su defecto un matorral denso bien conservado, si se atiende estrictamente a las recomendaciones recogidas tanto en las *Clasificaciones Agrológicas de Suelos* como en las *Guías de Conservación de Suelos*, que resultan normas de obligada recopilación en todo documento de ordenación agro-hidrológica. Sin embargo, muchos de estos terrenos son utilizados como pastizales y no pocos se cultivan, en ocasiones por justificadas razones sociales.

A continuación se pretende aportar una interpretación lógica de las recomendaciones recogidas en los dos tipos de documentos citados, ajustándose a las distintas realidades que se pueden presentar en el escenario que se comenta.

1. En relación con los pastizales, las recomendaciones limitan este uso del suelo a terrenos cuya pendiente no rebase el 30 %, si se pretende asegurar en ellos el control de la erosión hídrica; pero es evidente que existen pastizales en todas las partes del mundo, cualquiera que sea su nivel económico y cultural, en terrenos con pendientes superiores al 30 % y, mientras se mantengan en buen estado de conservación, da la impresión de que no hay razón para que no sigan existiendo. Al respecto se comenta lo siguiente:

Si bien es cierto que los análisis teóricos y las experiencias *ad hoc* señalan al 30 % de pendiente como el valor máximo para garantizar la total estabilidad de un pastizal; también es cierto que los pastizales permanentes continúan aportando protección al suelo ante la erosión hídrica en terrenos que rebasan dicha pendiente. Su eficacia se reduce conforme se incrementa el gradiente del terreno, sobre todo para las situaciones generadas tras las precipitaciones torrenciales extraordinarias, pero no se anula, mientras la degradación del suelo en la ladera no alcance niveles que resulten irreversibles. Por tanto, tratándose de pastizales, junto a la pendiente del terreno hay que especificar también el estado de conservación del suelo en la ladera en cuestión, lo que normalmente viene asociado a sus condiciones edáficas y a su profundidad.

Sin embargo, cuando la pendiente del terreno alcanza valores elevados, del orden de un 60 % o superiores, y sobre todo cuando se trata de pastizales que no presentan protección alguna en las zonas dominantes de la ladera, su eficacia disminuye sustancialmente y el riesgo de procesos importantes de erosión superficial e incluso de deslizamientos epiteliales ante la ocurrencia de eventos torrenciales extraordinarios resulta muy elevado dentro de los mismos.

2. Los terrenos genuinamente de cultivo no sobrepasan el 3 % de pendiente, a partir del cual aparecen los primeros síntomas de erosión laminar; pero en el ámbito convencional de la ordenación agro-hidrológica el área destinada a los cultivos se suele extender a

terrenos de hasta un 12 % de pendiente, aplicando, por supuesto, las *medidas de conservación de suelos*, entendiéndose por tales: el cultivo a nivel; el cultivo en fajas y el cultivo en terrazas en su forma más sencilla (preparación del suelo constituido por un surco y su correspondiente caballón).

En terrenos con pendientes superiores al 12 % y hasta alcanzar el 24 %, los cultivos deben protegerse mediante *prácticas de conservación de suelos*, entre las que se incluyen las terrazas continuas y el abancalado. Existen también prácticas locales de conservación de suelos, que consisten en combinaciones de las anteriores o en un reforzamiento de las mismas mediante labores de subsolado para controlar mejor el movimiento de la lámina de escurrido.

Por encima del 24 % de pendiente no se recomienda cultivar directamente el suelo, pero se puede practicar la agricultura si se realiza en bancales con taludes bien estabilizados, en ocasiones hasta con muros de piedra (como en algunas localizaciones de la vertiente mediterránea española de las provincias de Alicante, Baleares o Castellón u otras regiones mediterráneas de Italia y Grecia, por citarlos como ejemplos). También en América Latina existen cultivos bien abancalados en pendientes superiores al 24 %, como las plantaciones bajo sombra de café arábigo en Costa Rica, que no presentan riesgos previsibles de erosión hídrica.

En definitiva, el escenario que se comenta no es propicio para grandes áreas de cultivo; sino que el cultivo se debe acomodar dentro del mismo a aquellos lugares en los que resulta viable; como pueden ser las pequeñas superficies de pendiente reducida dentro de unos parajes de elevados gradientes del terreno, o en zonas en las que, aunque las pendientes sean elevadas, se han realizado en ellas trabajos de sistematización y estabilización del terreno, que permiten la práctica de la agricultura en las mismas sin riesgo aparente de erosión acelerada del suelo. Pero en ambos casos, la aplicación de la agricultura en este escenario tiene unos costes adicionales, que el agricultor debe afrontar para mantener el aprovechamiento sustentable en su explotación.

Con tales medidas el riesgo de que aparezcan procesos erosivos importantes en las superficies cultivadas no desaparece definitivamente, pero se limita de manera razonable y con ello se mantiene en equilibrio una producción agrícola marginal que socialmente puede ser necesaria. Evidentemente, si ante un evento torrencial extraordinario aparecieran graves procesos erosivos en dichas superficies, lo conveniente es atajar el problema sin dilación, pues las consecuencias posteriores podrían ser imprevisibles.

Las recomendaciones aportadas por las *Guías de Conservación de Suelos*, son el resultado de numerosas experiencias realizadas en cultivos y pastizales, muchas veces corroborados con modelos matemáticos elaborados *ad hoc* con la misma finalidad. Sin embargo, se trata de resultados obtenidos para unas condiciones de ensayo, en modelos simplificados, por lo que en su aplicación a las superficies de la cuenca hidrográfica debe ajustarse a la nueva realidad, donde la Naturaleza presenta numerosas variables de difícil cuantificación. Por ello una ajustada aplicación de las *Clases Agrológicas* en este escenario, puede resultar muy eficiente para poner en cultivo exclusivamente las zonas del mismo que presentan aptitudes para ello.

1.3.3. Análisis del escenario I.1.-B

1.3.3.1. Descripción

Áreas de alta montaña con laderas de pendientes suaves a moderadas. Puede coincidir con terrenos paleozoicos muy moldeados, de litología silíceo poco erosionable, cuyos cursos de agua no presentan un marcado carácter torrencial, salvo con ocasión de alguna crecida generada por lluvias torrenciales extraordinarias. En cuanto a la vegetación resulta válido todo lo expuesto para el escenario I.1.-A.

1.3.3.2. Fenomenología geo-torrencial

Las avenidas generadas por los aguaceros torrenciales, sobre todo por eventos extraordinarios, podrían provocar inundaciones en las zonas más bajas del presente escenario y con mayor intensidad en las del escenario II.1.-B, que supone su continuidad en la cuenca hidrográfica, debido al perfil de suave a moderado de su relieve; pero el flujo será bifásico y el transporte sólido predominantemente en suspensión; salvo en los tramos iniciales de los cursos de agua en los que éstos podrían comportarse como auténticos torrentes de montaña ante precipitaciones extraordinarias. En resumen, más que hablar de una fenomenología geo-torrencial, se debe hablar de fenómenos torrenciales y más que de problemas geo-torrenciales, de problemas hidrológicos.

1.3.3.3. Esquema corrector

Criterios y objetivos de la corrección

En relación con los *torrentes*, como norma general no parece que sea necesario corregirlos. No obstante, si por alguna circunstancia especial hubiera que hacerlo, se tendrían en cuenta los mismos criterios y objetivos que se han descrito para el escenario I.-A en su conjunto.

En cuanto a la protección ante el *desprendimiento de aludes*, tampoco nos encontramos en un escenario de grandes riesgos, pues el desprendimiento de aludes necesita que las pendientes del terreno superen el 60 % y no son éstas las circunstancias. Pero en el supuesto improbable que tuvieran lugar, se atendería a lo indicado al respecto para el escenario I.1.-A.

En lo referente a las *vertientes de la cuenca hidrográfica*, toma especial significado la cuestión del tipo de cobertura vegetal que puede resultar más idóneo para la protección del suelo en este tipo de escenarios. Se trata de laderas de escasa pendiente, en principio no aptas para el cultivo por la brevedad de su periodo vegetativo (al menos en Europa); tampoco se trata de suelos que requieran de una cubierta vegetal protectora densa, porque sus pendientes son suaves, lo que reduce su vulnerabilidad ante la erosión y posiblemente se trate de suelos de perfiles poco evolucionados a consecuencia de su posición altimétrica y del clima (también en el caso de Europa). Como resultado de todo lo expuesto, se llega a la conclusión de que la protección de los suelos del presente escenario podría estar asegurada utilizando estructuras vegetales de escaso desarrollo aéreo y sistema radical bien desarrollado y penetrante. De este modo se reduce la transpiración y se consigue un mejor aprovechamiento hídrico en el caso, por ejemplo, de que el escenario en cuestión sea la componente principal de la superficie de la cuenca alimentadora a un embalse. Lo expuesto no es impedimento para que terrenos identificados como del presente escenario se aprovechen como bosques, incluso siendo

vertientes directas a embalses de abastecimiento de aguas; porque los bosques por lo general soportan menos ganado y ello reduce los problemas de eutrofización en los embalses.

En América Latina este escenario se podría identificar con los páramos de altura, cuya vegetación natural tampoco tiene un gran desarrollo aéreo y sí un entramado radical con la potencia suficiente para mantener los andosoles sin alterarse

Una cuestión a tratar en relación con este escenario, son los *problemas hidráulicos por anegamiento* que podrían surgir en sus cotas más bajas en el caso de precipitaciones torrenciales, tanto normales pero sobre todo extraordinarias; debido a que su drenaje pudiera resultar lento por estar condicionado al escaso gradiente que presentan las laderas que configuran su relieve, aunque los problemas más graves que pudieran derivarse por esta situación se manifestarían en el escenario II.1.-B, por las razones ya indicadas. Este efecto puede ser aprovechado como un elemento singular del paisaje; pero en el hipotético caso de que el entorno donde tiene lugar la inundación estuviera habitado, habría que estudiar sus límites y planificar las consecuencias del mismo para la población; en cualquier caso la hipótesis planteada es poco probable, porque se trata de áreas de alta montaña.

Técnicas utilizadas en la corrección

Salvo para el hipotético caso de inundaciones en las cotas más bajas del presente escenario, que pudieran afectar a zonas habitadas o a infraestructuras; en cuyo caso la solución sería protegerlas mediante *muros* tratándose de viviendas o plantear *trazados alternativos* (temporales o fijos) en el caso de las infraestructuras; no se referirá directamente a las técnicas de corrección, cuya necesidad inmediata no se advierte, sino únicamente al aprovechamiento racional y deseable de los terrenos del escenario que se comenta dentro de la ordenación agro-hidrológica, en su doble aspecto agronómico y lúdico; como medida preventiva ante una transformación no deseable del escenario en cuestión.

En el aspecto agronómico, estos terrenos se pueden utilizar indistintamente como áreas de bosque (hasta donde *climáticamente* resulta posible) o como pastizales de altura, incluso como una combinación de los mismos; cualquier opción resulta técnicamente justificable; aunque una combinación de bosque y pastos podría ser lo más acertado.

Tampoco hay que descartar la opción de declararlos como espacios protegidos, con una de las múltiples figuras legales que existen para catalogarlos. Ésta podría ser una buena solución para algunos parajes vírgenes o casi-vírgenes de América Latina, como los *páramos*, que por la importante función hidrológica que desempeñan en la cuenca, resulta de enorme interés conservarlos en su estado natural.

En cuanto al aspecto lúdico, conviene considerar que el hecho de que este escenario no presente riesgos de desprendimiento de aludes, no implica que no disponga del suficiente manto de nieve en invierno, como para que pueda ser aprovechado para practicar los deportes de invierno. Planificar una buena ordenación del territorio desde el principio, puede resultar decisivo para preservar en el futuro los valores de todo tipo (biológicos, paisajísticos, etc.) de la zona, evitando errores que pudieran derivarse de cualquier tipo de intervenciones agresivas o al menos no deseadas en el medio, que a posteriori resultan difíciles de subsanar y que terminan afectando a la conservación del suelo y del agua en el paraje en cuestión. Conservar estos elementos es un objetivo irrenunciable en una ordenación hidrológico-forestal.

1.3.4. Análisis del escenario I.2.-B

1.3.4.1. Descripción

Áreas de montaña de relieve ondulado con laderas de pendientes suaves a moderadas. El riesgo de aludes es prácticamente nulo. En cuanto a la vegetación no existen limitaciones para que el bosque pueda ocupar cualquier cota del terreno, siempre que disponga del perfil edáfico suficiente.

1.3.4.2. Fenomenología geo-torrencial

Básicamente responde a lo comentado para el escenario I.1.-B. Es posible que se incremente el transporte sólido en suspensión con ocasión de los eventos torrenciales, sobre todo si son extraordinarios, en los cauces que drenan por las vertientes de suelos más profundos y escasamente protegidas por la vegetación; pero sin alterar el esquema geo-torrencial definido para aquel escenario.

1.3.4.3. Esquema corrector

Criterios y objetivos de la corrección

Tanto en lo referente a los *torrentes* (que en principio no parece que presenten problemas en este escenario) como ante el riesgo de *desprendimiento de aludes* (cuya probabilidad es muy reducida o nula) se remite a lo expuesto en escenario I.1.-A, para lo que le pudiera afectar.

En cuanto a las *vertientes de la cuenca hidrográfica*, el papel que desempeña la vegetación puede ser importante. Al tratarse de áreas de pendientes entre suaves y moderadas, en condiciones normales los terrenos en cuestión pueden prescindir de cubiertas arboladas para conseguir la protección adecuada de sus suelos frente a la erosión hídrica; por tanto se pueden aprovechar como pastizales, como monte bajo de matorral no degradado e incluso dedicarlos al cultivo, con la previsible ventaja de que ello pueda repercutir en una menor transpiración y por ende en una mejor utilización del agua como recurso. No obstante, se trata de áreas dominantes, en los que el bosque puede desempeñar una función protectora de primer orden para toda la cuenca vertiente ante precipitaciones torrenciales normales, aunque su eficacia resulte menor ante los eventos torrenciales extraordinarios, pero en ningún caso ésta es nula; todo ello cobra mayor interés en los terrenos con mayores pendientes, o en aquellos otros que por su orientación pudieran contribuir a la captación del agua de las precipitaciones horizontales y nieblas.

Pudiera darse el *problema hidráulico de anegamiento* en las cotas más bajas del presente escenario en el caso de avenidas torrenciales extraordinarias; aunque el mismo resulta mucho más factible y preocupante para el escenario II.2.-B, que representa la continuación del presente en lo que a la cuenca hidrográfica se refiere.

Técnicas utilizadas en la corrección

Las técnicas a emplear en el presente escenario, para el caso de que tuviera lugar una inundación de sus cotas más bajas; son las mismas que se han propuesto para resolver el mismo problema en la situación del escenario I.1.-B (apartado 1.3.3.3.).

A continuación, siguiendo el esquema adoptado para el escenario anterior I.1.-B, no se referirá directamente a las técnicas de corrección, cuya necesidad inmediata no se advierte, sino a la conveniencia de plantear una ordenación agro-hidrológica para este escenario.

El hecho de que se trate de una zona de relieve moderado, capacita a sus suelos para cualquier tipo de aprovechamientos. Esta realidad, que se asume perfectamente a corto plazo, debe ser analizada con una visión a medio y largo plazo. Una ampliación de los cultivos en el área dominante (que es el caso que se analiza) da lugar a cuencas básicamente agrícolas, pues el destino preferente de las áreas dominadas son los cultivos (por tratarse en general de las zonas de suelos más profundos y con mejor microclima). La mayoría de los cultivos necesitan del riego (o al menos de agua) para ser rentables, por lo que las necesidades hídricas para una cuenca en su mayor parte cultivada, podrían llegar a igualar o incluso superar a las que demandaría la misma cuenca si tuviera una parte de su área dominante con arbolado, sin las ventajas de protección del suelo que ofrece el arbolado situado en dichas zonas estratégicas, que a la larga pueden ser efectivas para asegurar la propia agricultura que se practica en la cuenca.

Por otra parte, una cuenca con las cabeceras arboladas y las áreas dominadas con cultivos, representa un sistema estable a lo largo del tiempo, pues los fenómenos geo-torrencales se comienzan a controlar en su origen con una inversión moderada (en la cabecera los fenómenos erosivos son más graves y además sus efectos se transmiten a posteriori a toda la cuenca). Es decir, un sistema conformado como se acaba de exponer, se defiende mejor de los efectos de las precipitaciones torrencales ordinarias, además de contribuir al mantenimiento de la biodiversidad. Para ilustrar con un ejemplo lo que se quiere transmitir, se plantea la siguiente pregunta: ¿Hasta donde resulta rentable extender el cultivo pendiente arriba en una ladera?. ¿Hasta donde es rentable a corto plazo o hasta donde lo permite un desarrollo sostenible?. Evidentemente hay cultivos que por su alta rentabilidad permiten destinar importantes inversiones en técnicas de conservación de suelos, realizando importantes nivelaciones del terreno; pero incluso en estos casos, el tramo final de la ladera se destina al monte arbolado o al menos a una vegetación permanente, porque su ausencia supone el riesgo de que se llenen de agua y sedimentos los bancales situados en las cotas más elevadas para cualquier precipitación torrencial, aunque sea normal.

1.3.5. Análisis del escenario II.1.-A

1.3.5.1. Descripción

Se trata de las zonas dominadas de los torrentes de montaña situados en los parajes de orografía montañosa del escenario I.1.-A. Aunque las pendientes en el área en cuestión resulten inferiores, tanto en las laderas como en los lechos de los propios torrentes, aún siguen siendo elevadas y con frecuencia alcanzan en éstos últimos valores del orden del 10 % o incluso mayores. En cuanto a la cubierta vegetal, el escenario en cuestión no presenta problemas para la existencia del bosque, salvo los impedimentos que puedan surgir en zonas concretas por falta de perfil edáfico.

1.3.5.2. Fenomenología geo-torrencial

La dinámica geo-torrencial de este escenario es una prolongación de la que se presenta en el I.1.-A; por lo tanto puede llegar a ser muy intensa en el caso de precipitaciones torrenciales extraordinarias; siendo su máxima manifestación la formación en el curso torrencial de un gran cono de sedimentación, que se puede generar con cualquier tipo de flujo en el torrente, sea monofásico o bifásico.

El escenario en cuestión también puede ser receptor de los aludes que se desprenden del escenario superior I.1.-A, sobre todo de los conocidos como *aludes de fondo o de corredor*, que utilizan para su descenso los mismos canales por los que transitan los torrentes.

Aunque lo indicado en los dos párrafos anteriores responde a la gran mayoría de las situaciones que se identifican con el presente escenario y a ellas se referirá en lo que se comenta del mismo a continuación; no se debe obviar que se pueden presentar situaciones de un equilibrio prácticamente total para el torrente, cuando el mismo confluye directamente en el curso al que es tributario y este último lleva en todo momento (en todo el año) un caudal y una capacidad de transporte sobradamente suficientes, para que la descarga del torrente (líquida y sólida) pueda ser absorbida por el mismo sin dificultad, incluso en los momentos de máximas crecidas extraordinarias del torrente. Pero estas condiciones son más específicas del escenario siguiente II.2.-A y, por tanto, son en éste donde se desarrollaran con mayor detalle.

1.3.5.3. Esquema corrector

Criterios y objetivos de la corrección

En relación con el comportamiento de los *torrentes*, en el escenario I.1.-A se ha comentado que ante sus crecidas o avenidas, en especial cuando lo ocasionan los eventos extraordinarios, la cuestión central radica en conducir aguas abajo la corriente cargada de sedimentos del torrente, hasta que confluya en otro curso de mayor caudal y con suficiente capacidad de transporte, para que lo absorba con toda su descarga líquida y sólida y a continuación le transporte junto con su propia descarga aguas abajo. El problema que puede surgir en el presente escenario, es que la formación del cono de sedimentación del torrente dificulte dicha confluencia y la posterior evacuación del caudal sólido que transporta el torrente. Se trata, por tanto, de analizar la manera en que tiene lugar la formación del citado cono y estudiar el modo para que el flujo principal del torrente lo atraviese y desemboque en la corriente principal a la que por morfología es tributario.

Puede ser interesante de considerar el caso de un torrente que desemboque directamente en un lago de montaña, ante la posibilidad de que por un evento torrencial extraordinario el torrente descargara un caudal sólido importante sobre el lago, que afectase seriamente a la estabilidad momentánea del mismo y transmitiera una onda de avenida por su sumidero a todo el sistema de drenaje aguas abajo. La cuestión podría generar situaciones difíciles de prever, pero que podrían ser muy graves. También se puede considerar la variante en la que lo que incide sobre el lago sea un alud de grandes dimensiones.

Respecto de la *protección contra los aludes*, se trata de defenderse de sus efectos; pues cuando inciden en el escenario en cuestión es porque ya se han desprendido. Para ello se pueden utilizar *medidas de desviación* del recorrido del alud, o *dispositivos para su frenado* en zonas donde el alud haya perdido una parte de su energía cinética; el efecto esperado con los dispositivos de frenado (que deben tener cierta elasticidad, para que en ningún caso entren en carga) es conseguir que el alud pierda el resto de su energía y detenerlo. En cualquier caso las actuaciones adoptadas deben prever la ubicación de la masa de nieve desviada o frenada, así como controlados los previsibles movimientos de la misma hasta llegar al lugar de su depósito.

El *empleo del bosque* en este escenario merece un análisis detenido. Es interesante su presencia como estabilizador del suelo en las zonas en las que no interfiera para nada el recorrido de la corriente, pues se trata de superficies con pendientes en general elevadas; pero no en las áreas que pudiera interrumpir su paso; pues lo probable es que, en situaciones de avenidas extraordinarias, terminaría por obstruir la nueva sección que toma el cauce durante la avenida, provocando casi con toda probabilidad represamientos temporales que, de prolongarse el fenómeno torrencial, podrían terminar destruyéndose y generando una onda que se transmita aguas abajo del torrente, de consecuencias en cualquier caso no deseables, cuando no catastróficas.

Técnicas utilizadas en la corrección

Corrección de torrentes

Tras haber surtido los *diques rastrillo* los efectos oportunos en los tramos del torrente situados aguas arriba del presente escenario; en éste que nos ocupa el torrente debe entregar su descarga (líquida y sólida) en el curso al que es tributario. Para ello existen diferentes técnicas dependiendo de la complejidad que se presenta en cada situación y en especial para aquellas que tienen lugar coincidiendo con avenidas torrenciales extraordinarias. La solución más efectiva, pero también la más costosa, es la construcción de un *canal escalonado de tramos erosionables*, que atraviese todo el cono de deyección desde su inicio hasta la desembocadura del torrente en el curso al que es tributario. Dicha estructura dispone de un *dique de cierre* al inicio del canal, para regular el flujo que entra en el mismo; a continuación consiste en un conjunto de *tramos canalizados*, en forma de escalera muy tendida, de modo que en cada escalón la corriente experimente la formación de un resalto hidráulico; el calado conjugado resultante del mismo, se estabiliza en el tramo canalizado de aguas abajo, antes de que la corriente experimente un nuevo resalto en el escalón del final de dicho tramo. La corriente continúa operando de igual modo en los tramos siguientes, hasta que el torrente termine todo el recorrido del canal.

Sistemas de defensa contra los aludes

En lo relativo a la *protección contra los aludes*, para desviar sus recorridos se utilizan *cuñas* y para frenarlos *muros de tierra*, aunque en los supuestos en los que la probabilidad de riesgo del alud resulte menor o los daños potenciales previsibles sean reducidos, también se han usado *montones de tierra* situados estratégicamente en la zona de parada del alud. Las *cuñas* son muy utilizadas para proteger casas o edificios aislados, como refugios, pequeñas iglesias de montaña, etc.

La utilización del arbolado en las áreas dominadas

En relación con el *uso del arbolado* en este escenario, se remite a lo referido en los criterios y objetivos establecidos en su esquema corrector, tanto para las superficies directamente afectadas por el drenaje y sus zonas adyacentes, como para las superficies no afectadas por el mismo pero pertenecientes también al escenario en cuestión.

No obstante, no se debe pasar por alto la incidencia del bosque, situado aguas arriba del área donde se ubica el cono de sedimentación propiamente dicho, en la protección del mismo. En el caso que se ha comentado del torrente que desemboca directamente en un lago de montaña, si las vertientes al lago están cubiertas de arbolado, el riesgo de caída de aludes disminuye, porque el bosque incide en los procesos de la metamorfosis de la nieve, estabilizando con ello su manto. Asimismo también puede contribuir a reducir la erosión superficial de las laderas vertientes al lago, contribuyendo con ello a mantener la calidad de las aguas y a prolongar la vida del lago. Además, se menciona únicamente de pasada la necesidad de preservar estos lagos de cualquier agente contaminante; para lo que una de las medidas más serias es mantener el torrente bajo estrictas medidas de control, incluida su corrección hidráulica, que si a posteriori conviene naturalizarla para que no aparezcan impactos paisajísticos, la solución pasa por realizar los trabajos de naturalización; aunque en el ámbito en el que se plantea es posible que no resulte necesario, porque el tiempo se encargue de hacerlo, si el diseño corrector se adapta convenientemente al entorno.

Con frecuencia una parte importante de la superficie de este escenario suele estar dedicado a pastizales, aprovechamiento que técnicamente no debe presentar problemas, mientras las pendientes del terreno no sean muy elevadas, pero que es preciso controlarlo.

Otras cuestiones a considerar en el ámbito del presente escenario

En terrenos en pendiente de áreas de altitudes elevadas, los conos de sedimentación de los torrentes no alcanzan por lo general grandes extensiones de superficie; aunque en ocasiones sí las suficientes para que en su proximidad se ubique un pequeño núcleo de población; ejemplos de lo dicho se ven en todos los países alpinos. Aunque las aldeas asentadas en estos parajes desde tiempos históricos, suelen estar dotados de elementos que les protegen de los eventos torrenciales extraordinarios (en algunas ocasiones están asentados sobre un inesperado afloramiento rocoso; en otras la pendiente del terreno hace el efecto de cuña, que desvía al torrente alejándolo de la población; o existe un encauzamiento natural del torrente de suficiente calado (tirante), asentado total o parcialmente sobre de un estrato rocoso, etc.), pero con todo, siempre es conveniente proteger los márgenes de estos asentamientos con *escolleras* y *protecciones longitudinales*, reforzados con *umbrales de fondo* en el propio lecho torrente si este no es totalmente rocoso, para evitar su socavación que pudiera derivar en deslizamientos de laderas. Pero la idea central que debe prevalecer en este escenario, es que la corriente debe adquirir una pendiente, que le permita una rápida evacuación del área de sedimentación.

1.3.6. Análisis del escenario II.2.-A

1.3.6.1. Descripción

Se trata de las áreas dominadas de las cuencas vertientes a cursos torrenciales que discurren y han discurrido por parajes de orografía accidentada; aunque no sea especialmente de alta montaña. En algunas ocasiones las características de este escenario presentan una gran similitud con las del escenario anterior II.1.-A, incluida la formación del cono de sedimentación en el curso torrencial. Pero en otras, la confluencia del curso torrencial con el curso principal al que es tributario se realiza de un modo directo y suave, en parte condicionado por la gran capacidad de arrastre de este último; pero también porque el curso torrencial se encuentre suficientemente regulado, bien de forma natural o mediante una rectificación hidráulica del mismo.

El bosque no encuentra problemas para su implantación en este escenario (salvo en algún lugar concreto en el que falte el suficiente perfil edáfico), además en ocasiones desempeña una intervención importante en el sistema corrector del mismo, como elemento de rectificación de márgenes de riberas. Otro aspecto importante de este escenario es el relativo a su altitud, que permite contemplar la posibilidad de que el curso torrencial desemboque directamente en el mar, circunstancia que es mucho más habitual y de mucha mayor trascendencia de que lo que a primera vista pudiera parecer.

1.3.6.2. Fenomenología geo-torrencial

Cuando el curso torrencial que recorre el presente escenario genera su propio cono de sedimentación, la solución expuesta para el escenario anterior II.1.-A resulta también válida para el que nos ocupa. Aunque en éste, al presentar menor altitud, la posibilidad de ser área receptora de aludes se reduce, salvo que se trate de latitudes muy elevadas (por ejemplo, en las cuencas ubicadas en Tierra de Fuego). Además, por las altitudes que abarca el escenario, el cono de sedimentación del torrente se puede formar en la misma costa, cuando el curso torrencial desemboca directamente al mar.

Otra situación que se puede dar en este escenario, es que el curso torrencial no forme su cono de sedimentación o, que incluso formándolo, no encuentre ningún obstáculo importante para que confluya directamente en el curso principal al que es tributario. Pero en cualquier caso, cuando sobre la cuenca sobrevienen precipitaciones torrenciales extremas, se generan avenidas extraordinarias tanto en el curso torrencial como en el principal, dando lugar a caudales punta elevados con un gran aporte de sedimentos tanto en suspensión como en acarreos, normalmente a modo de flujo bifásico; causando el desbordamiento de sus cauces ordinarios e inundando sus áreas limítrofes, que posteriormente, tras el paso de la avenida, quedarán cubiertos de sedimentos.

1.3.6.3. Esquema corrector

Criterios y objetivos de la corrección

En los casos en los que los *cursos torrenciales* desarrollen su cono de sedimentación, lo expuesto para el escenario II.1.-A resulta también de aplicación para el presente. Además, en este escenario puede ocurrir que el curso torrencial desemboque directamente en el mar y que

un único evento torrencial extraordinario sea suficiente para el curso torrencial forme en la costa un gran cono de sedimentación. Para tal situación se debe plantear el siguiente análisis:

1. Si curso torrencial que desemboca directamente al mar, lo hace en un paraje deshabitado y sin vías de comunicación, la formación del cono de sedimentación pasará inadvertida y no es necesario de momento realizar de ninguna medida de corrección, pero sí tenerlo en cuenta para el futuro.
2. Pero si el curso torrencial desemboca en el mar cerca de núcleos habitados, incluso en ocasiones de grandes poblaciones turísticas (algo que se presenta en todas las latitudes, tanto en países en vías de desarrollo como en los muy desarrollados), la situación reclama una planificación de la *corrección completa del sistema de drenaje de la cuenca y de la restauración hidrológico-forestal de esta última*; utilizando para tal fin todas las técnicas de corrección de torrentes y de restauración hidrológico-forestal de sus cuencas alimentadoras. Además, *es de una importancia capital dejar el canal o espacio suficiente al curso torrencial, para que en los momentos de sus máximas avenidas extraordinarias desemboque directamente al mar sin que se le presenten obstáculos*. Algo que, a pesar de su innegable importancia, en la práctica no es fácil de conseguir.

En las situaciones en las que el curso torrencial confluye en el curso principal al que es tributario de forma directa y suave, la afluencia puede suceder de forma totalmente natural, pero en ocasiones resultan necesarias ciertas rectificaciones en el tramo final del curso torrencial para conseguirlo. Éstas requieren como punto de partida un esquema *directriz en planta del tramo a corregir* consecuente con el régimen hidrodinámico de su corriente; para abordar a continuación las acciones rectificadoras mediante *obras longitudinales al cauce*, para conseguir la protección de sus márgenes y riberas.

En la actualidad se han puesto en valor todas las *actuaciones de naturalización paisajística de las obras longitudinales*, utilizando con frecuencia materiales vivos, como estaquillas de las especies de los géneros *Salix* y *Alnus*, para delimitar los márgenes de los cursos de agua; de manera que pasados dos o tres años éstas reverdecen y conforman una galería de vegetación en el curso en cuestión. De este modo se han integrado nuevamente al ámbito de la corrección de cauces, incluidos los cauces torrenciales, las técnicas que en el pasado fueron muy utilizadas para la ejecución de *faginadas* y *palizadas*, con el fin de tapizar los taludes que incidían directamente en los torrentes objeto de corrección; sin que se descarte que estas actuaciones continúen realizándose en el presente, aunque por un tiempo estuvieran olvidadas.

En cuanto al *arbolado* propiamente dicho, su principal aplicación en este escenario es como integrante del *bosque en galería* a ambos márgenes de los cursos a corregir

Técnicas utilizadas en la corrección

Corrección de cursos torrenciales

En el escenario anterior II.1.A se ha propuesto el *canal escalonado de tramos erosionables*, como la solución técnica más adecuada para conseguir que el curso torrencial descargue su flujo sobre el curso principal al que es tributario, superando las dificultades ocasionadas por el propio torrente con la formación de su cono de sedimentación. Esta solución resulta válida también en el presente escenario, cuando se trata de resolver el mismo problema; e incluso cuando el cono de sedimentación del torrente se forma sobre la propia costa, porque éste desemboca directamente al mar, en un entorno en el que la costa se encuentra urbanizada.

Como ejemplo más representativo en América Latina de lo que se acaba de comentar, se citan las obras de corrección de torrentes que se están llevando a cabo en el estado de Vargas (Venezuela), tras las avenidas torrenciales extraordinarias que tuvieron lugar en dicho país en diciembre de 1999. Dichos torrentes se dirigen directamente al mar desde una altitud de 2000 m, e inciden sobre una zona turística de la costa atlántica venezolana.

Tratándose de cursos torrenciales que inciden directamente al mar en una costa en la que se asientan núcleos población, junto al *canal escalonado de tramos erosionables* o un *canal convencional de evacuación* que descargue las máximas avenidas extraordinarias del curso torrencial al mar, se deben proyectar áreas laterales de resguardo y protección, estableciendo de este modo el pasillo del tramo final del curso torrencial, que constituye la obra principal del sistema de corrección. Pero además se debe planificar y ejecutar la *corrección completa del sistema de drenaje de la cuenca y la restauración hidrológico-forestal de esta última*, lo que implica corregir los tramos del curso torrencial situados aguas arriba del canal de evacuación, mediante *diques rastrillo* transversales al curso torrencial (en la situación más general) o *diques de consolidación* también transversales al curso torrencial (cuando sea necesario sujetar los taludes que conforman el cauce del torrente); así como las *medidas de creación y mantenimiento del bosque* en las vertientes de la cuenca, que por sus pendientes y posición altimétrica deban protegerse con arbolado. También se deben tomar las medidas de prevención necesarias, para que ante avenidas extraordinarias no se produzcan taponamientos en los cauces, por retención de residuos de grandes dimensiones procedentes del propio bosque (como troncos, ramas, etc.) que contribuyan a agravar los efectos catastróficos de la avenida.

Sistemas de defensa contra los aludes

Si sobre el área en cuestión se desprendieran *aludes*, circunstancia poco probable, se atendería a lo expuesto para el escenario anterior II.1.-A.

Obras longitudinales de defensa de márgenes y riberas en un curso de agua

Cuando las características geo-torrenciales del curso de agua son moderadas y las actuaciones a realizar en el mismo no inciden directamente sobre la dinámica geo-torrencial, sino que tratan de presentar un obstáculo continuo a la expansión lateral de las aguas en crecida, se recurre a las *obras longitudinales al cauce*. Estas obras, que se proyectan previa adopción de un esquema directriz en planta del tramo a corregir, consecuente con el régimen hidrodinámico de su corriente, pueden consistir exclusivamente de *ingeniería hidráulica* (*malecones o escolleras, espigones*), *biológicas* o *bioingenierías* (*bosque en galería a ambos márgenes del cauce*) o *mixtas* (formadas por la combinación de ambos). En cualquier caso, hay que tener en cuenta que las obras longitudinales tienden a elevar el calado de la corriente, con lo que incrementan la tensión de arrastre de ésta; por ello, tratándose fundamentalmente de obras de ingeniería hidráulica o mixtas, es conveniente complementar las obras longitudinales con umbrales de fondo, transversales al cauce, para sujetar el lecho del curso en cuestión en el tramo encauzado. Es bastante común tratándose de este tipo de trabajos, que una vez que se han alcanzado los objetivos iniciales de defensa del cauce, sean objeto de labores de naturalización.

En algunos países, como en Costa Rica, la defensa de los márgenes de los cursos de agua mediante vegetación arbolada de riberas se recoge en su legislación medioambiental.

1.3.7. Análisis del escenario II.1.-B

1.3.7.1. Descripción

Áreas dominadas en zonas de altitudes elevadas y pendientes del terreno entre suaves y moderadas, lo que les predispone para ser aprovechadas como pastizales de altura o cultivos de temporada. Aunque no existan problemas para la presencia del bosque, éste puede reducirse a algunos bosquetes ocasionales o a plantaciones lineales de riberas.

1.3.7.2. Fenomenología geo-torrencial

El carácter torrencial del presente escenario lo definen casi exclusivamente las precipitaciones torrenciales extraordinarias, que pueden provocar importantes avenidas en los cursos que drenan por el mismo, llegando a inundar amplias superficies debido al perfil entre suave y moderado de su relieve, así como causar importantes efectos erosivos en los cultivos, especialmente cuando se asientan en terrenos con cierta pendiente y no se han tomado las medidas y prácticas de conservación de suelos pertinentes; incluso, si se han tomado, las lluvias torrenciales extraordinarias harán sentir sus efectos. El flujo en las avenidas resulta siempre bifásico, predominando la descarga sólida en suspensión. En el caso de que el curso principal llegue a formar un cono de sedimentación, éste será amplio y de escasa pendiente y, sobre el mismo, el curso en cuestión realizará numerosos meandros antes de abandonarlo y generar el canal de desagüe, que desembocará en un curso de mayor caudal al que es tributario. En resumen, más que una fenomenología geo-torrencial, se trata de fenómenos torrenciales que desembocan en problemas hidrológicos y de conservación de suelos.

3.7.3. Esquema corrector

Criterios y objetivos de la corrección

Aunque no se trate en sentido estricto de una medida corrección de un problema geo-torrencial, se pueden considerar como tales el *mantenimiento o la creación de formaciones arboladas en los márgenes de los cursos de agua* que drenan por el presente escenario, con el fin de proteger sus riberas y disminuir la emisión lateral de sedimentos a los citados cursos; formaciones que se conocen también por *bosques en galería*.

En el resto de las superficies del presente escenario, dadas sus características de pendientes suaves a moderadas, su vocación natural son los pastizales, pues se trata de zonas de cierta altitud y con un periodo vegetativo reducido; pero también son aptas para cultivos de temporada, en la medida en que las condiciones de clima lo acompañen; la alternancia de cultivos y pastizales es otra de las opciones; como también lo es la alternancia de cultivo y barbecho en las áreas de suelos más pobres; aunque el bosque también se puede presentar como una alternativa válida. En cualquier caso, para todo lo relativo a los usos del suelo, se recomienda atenerse a lo dispuesto en las *Clasificaciones Agrológicas de Suelos* y en las *Guías de Conservación de Suelos*, referidas anteriormente en este documento y a la interpretación que se ha realizado de las mismas.

Técnicas utilizadas en la corrección

Ante avenidas causadas por precipitaciones torrenciales ordinarias, la *protección de los márgenes de los cauces* que drenan por este escenario, se puede conseguir en buena medida

con el *mantenimiento o la creación de formaciones arboladas de ribera (bosques en galería)*. Si con las mismas no fuera suficiente, se llevarían a cabo las pertinentes correcciones del cauce, centradas en obras de rectificación mediante *espigones* o *escolleras*, que en los cursos de marcado carácter torrencial se completan con *umbrales de fondo*, para frenar la erosión del lecho causada por el incremento de la tensión tractiva de la corriente, provocada por la elevación del calado que imprimen las obras longitudinales. También se pueden utilizar *bioingenierías* (formación de márgenes con estaquillas vivas de las especies de los géneros *Salix* y *Alnus*) para asegurar la protección de los márgenes del cauce.

Cuando las avenidas corresponden a eventos torrenciales extraordinarios, las inundaciones resultan inevitables y el efecto del bosque en galería se reduce a señalar los márgenes del río en las avenidas ordinarias; pero ese mismo efecto, apreciablemente insuficiente, es totalmente conveniente, porque permite delimitar, por ejemplo, las áreas de salvamento. Por otro lado, conforme bajan las aguas y se restablece el caudal ordinario del río, el bosque en galería retiene todo tipo de arrastres laterales (sedimentos, restos orgánicos e inorgánicos, etc.) que de otro modo irían a parar a la corriente y podrían obturar el paso del flujo en algunas estructuras situadas aguas abajo de su recorrido, como en puentes, azudes etc.

En cualquier caso, cada día se considera más en serio la necesidad de tomar las medidas de prevención necesarias, para que ante avenidas extraordinarias no se produzcan taponamientos en los cauces, por retención de residuos vegetales de grandes dimensiones (como troncos, ramas, etc.) procedentes del arbolado que se encuentra próximo al cauce, lo que contribuyan a agravar los efectos catastróficos de la avenida.

1.3.8. Análisis del escenario II.2.-B

1.3.8.1. Descripción

Se trata de un escenario similar al anterior II.1.-B, difiriendo de éste en que su altitud es menor, lo que conlleva a que su periodo vegetativo sea más prolongado y a que los terrenos sean más propicios para el cultivo. Como en el escenario anterior no existan problemas para la existencia del bosque, aunque su presencia se reduzca a algunos bosquetes ocasionales o a plantaciones lineales de riberas.

1.3.8.2. Fenomenología geo-torrencial

En líneas generales en este escenario resulta válido lo indicado para el escenario II.1.-B, pero conviene efectuar algunas matizaciones al respecto. Ante unas precipitaciones torrenciales extraordinarias y generalizadas, si dicho escenario se corresponde con una cuenca hidrográfica de gran superficie, puede ser testigo de importantes avenidas y extensas superficies inundadas; mientras que si se trata de pequeñas cuencas hidrográficas, su vulnerabilidad podría ser la menos grave de todos los escenarios analizados en este apartado 1.3, aunque lógicamente se produzcan inundaciones.

Este estado de la cuestión puede variar sustancialmente, sobre todo tratándose de pequeñas cuencas, si la situación inicial del territorio más o menos estable se altera seriamente con intervenciones desafortunadas, modificando la red de drenaje natural para acondicionar el territorio a nuevos usos agrícolas de mayor productividad (se recuerda que el escenario en cuestión es eminentemente agrícola); en tal caso y ante precipitaciones torrenciales extraordinarias se podrían generar verdaderos procesos geo-torrenciales en las áreas afectadas por dichas modificaciones. Lo comentado ha sido un problema bastante habitual en las nuevas plantaciones de regiones que anteriormente se conservaban en su estado natural y que han sido puestas en producción de forma acelerada y sin las convenientes prevenciones medioambientales.

1.3.8.3. Esquema corrector

Criterios y objetivos de la corrección

Resulta válido lo expuesto para el escenario anterior II.1.-B, aunque en éste, si se trata de una gran cuenca hidrográfica, las avenidas y sus correspondientes inundaciones motivadas por las precipitaciones torrenciales extraordinarias resultarán más caudalosas y con mayores superficies anegadas. Mientras que si corresponde a pequeñas cuencas hidrográficas, los efectos resultaran más moderados.

En cuanto a los terrenos del escenario en cuestión, que no estuvieran directamente afectados por los cursos de drenaje y sus áreas limítrofes, se trataría de suelos de vocación agrícola, debiendo atenerse en ellos a las buenas medidas de cultivo y a las prácticas de conservación de suelos pertinentes, en función de la pendiente del terreno.

Técnicas utilizadas en la corrección

Prácticamente resulta válido lo expuesto para el escenario anterior II.1.-B, dado que los posibles problemas que se pudieran presentar serían de contenido semejante. Aunque

los relativos a la protección de los márgenes de los cursos de agua se podrían intensificar, especialmente en casos de eventos torrenciales extraordinarios; mientras que los relativos al manejo de suelos en los cultivos tenderán a simplificarse, por tratarse de un escenario típicamente agrícola. Pero en cualquier caso las técnicas de corrección no variarían sustancialmente de lo comentado para el escenario II.1.-B, sino únicamente se verán afectadas en su intensidad.

En cuanto a la corrección de los problemas geo-torrenciales que podrían aparecer, por el impacto de las precipitaciones torrenciales extraordinarias sobre los tramos alterados en el sistema de drenaje natural de la cuenca en el presente escenario; son de aplicación las *técnicas de reconstrucción de los cauces naturales* de la corriente, que representan una adaptación a la presente situación particular de las técnicas que se han expuesto para el conjunto de los escenarios II.1. y II.2.

2. LA INCIDENCIA DEL BOSQUE EN EL CICLO DEL AGUA Y SU REPERCUSIÓN EN LA ORDENACIÓN AGRO-HIDROLÓGICA Y EN LA RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-FORESTAL DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS.

Lo que se pretende con la ordenación agro-hidrológica de una cuenca vertiente es conocer su estado físico y su previsible comportamiento hidrológico y geo-torrencial ante los eventos torrenciales, como fase previa para llevar a cabo su restauración hidrológico-forestal, actuando para ello con las medidas pertinentes en las áreas y cauces objeto del proyecto restaurador, con los propósitos de reducir la vulnerabilidad de la cuenca ante los efectos que se deriven de su geo-dinamismo torrencial y contribuir a su aprovechamiento sustentable. La utilización de las cubiertas vegetales apropiadas en las diferentes zonas de la cuenca, desempeña un papel esencial en la consecución de ambos propósitos. En este contexto el bosque contribuye de un modo especial, pues constituye un elemento eficaz para regular el ciclo del agua y proteger al suelo de la erosión hídrica. Este es el principal asunto que se aborda en este capítulo.

Es evidente que los recursos hídricos se localizan dentro del ciclo del agua y resulta demostrable que el bosque, entendido como suelo forestal y cobertura arbolada, incide en dicho ciclo; pues condiciona el movimiento del agua dentro de la cuenca vertiente, regulando su velocidad de escurrido e incrementando su infiltración, luego interviene en lo que se puede definir como la componente horizontal del ciclo del agua. A ello hay que añadir que la transpiración de la masa arbolada del bosque impulsa una determinada cantidad de agua (en ocasiones elevada) hacia la atmósfera, cerrando de este modo la componente vertical del mencionado ciclo en la cuenca, que se inicia con las precipitaciones. Queda por añadir que también sobre estas últimas interviene el bosque: por un lado, interceptándolas con su cubierta aérea cuando se trata de precipitaciones verticales; por otro, cediendo la misma para facilitar en ella la formación de precipitaciones horizontales (principalmente condensaciones y formación de nieblas).

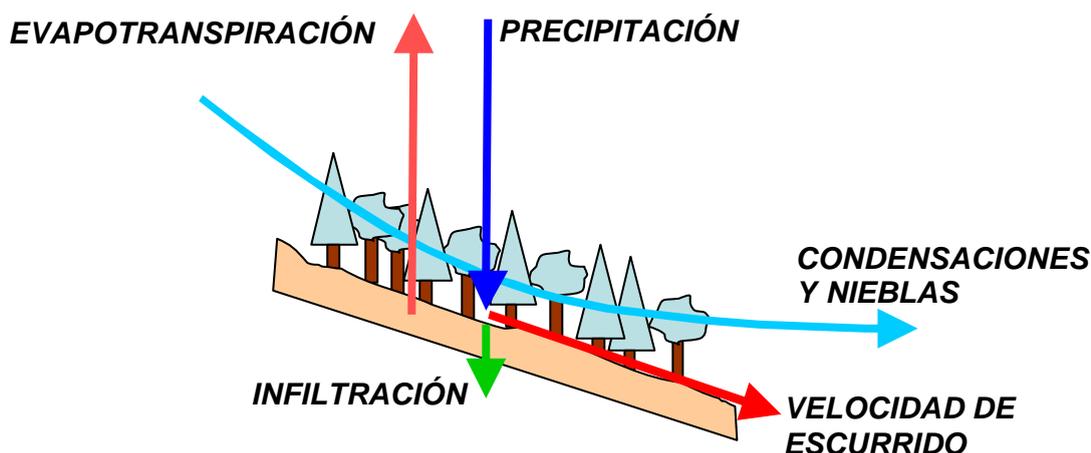


Figura 2.1. Incidencia del bosque en el ciclo del agua

De acuerdo con lo expuesto, la gestión forestal, que es el instrumento que maneja el bosque a lo largo del tiempo, interviene en el ciclo del agua y en consecuencia incide sobre los recursos hídricos.

Ante una ordenación agro-hidrológica, se pueden plantear tres preguntas respecto de la relación del bosque con el ciclo del agua.

Las dos primeras se refieren a los efectos del bosque en la cuenca vertiente cuando sobre ella inciden los eventos torrenciales, especialmente los extraordinarios, que son los causantes de las grandes avenidas que provocan las inundaciones en las áreas dominadas de la cuenca. Se trata de las siguientes:

1. ¿Interviene el bosque en la dinámica de la formación de las avenidas?
2. ¿Es cierto que a medida que aumenta la magnitud de una precipitación extrema, generadora del caudal de avenida, los posibles efectos del bosque en la laminación de la avenida son cada vez menos revelantes?

La tercera se plantea en el intervalo que transcurre entre dos eventos torrenciales consecutivos, especialmente cuando el mismo se prolonga y durante el periodo en cuestión se pueden presentar síntomas de sequía en la cuenca, causando problemas a su población. En este caso la pregunta se establece en los siguientes términos:

3. ¿Merece la pena utilizar el bosque como una medida para controlar las inundaciones en la cuenca hidrográfica, si es sabido que el bosque supone una descarga importante de agua hacia la atmósfera por transpiración e interceptación, lo que representa una pérdida importante de los recursos hídricos en los periodos entre eventos torrenciales, especialmente si se presentan sequías?

El objetivo de este apartado es tratar de responder a las tres preguntas, para los momentos precisos en los que tiene sentido formularlas; pero previamente se estima oportuno enumerar determinados aspectos intrínsecos, tanto del agua como del bosque, de los que no se puede prescindir en un análisis serio de las relaciones agua-bosque.

El agua como elemento cumple con la ecuación de continuidad y en la práctica no se puede entender el ciclo del agua de un modo atemporal, sino ligado al periodo concreto en el que se estudia, que puede tratarse tanto de un periodo húmedo como de uno seco.

El bosque, por su parte, es un elemento natural y vivo, que como tal se adecua a las condiciones que el clima y el suelo le imponen para existir, adquiriendo en función de éstos un tipo específico de formación (sea de coníferas, de frondosas o mixto) tratando de alcanzar con el tiempo lo que se conoce como la vegetación climácica o climax.

Por tanto, conviene aclarar que el contenido de las preguntas planteadas está dirigido fundamentalmente a la utilización del bosque ante situaciones espacio temporales concretas, que se relacionan con las necesidades de la población que habita en la cuenca para esas mismas situaciones, es decir, con la ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente, que contempla aspectos que sobrepasan de la mera circulación del agua en la misma, que es lo que se analiza a continuación.

2.1. LOS EFECTOS DEL BOSQUE EN LA LAMINACIÓN DE LAS AVENIDAS Y EN EL CONTROL DE LOS PROCESOS GEOTORRENCIALES QUE SE DESENCADENAN EN LA CUENCA, POR CAUSA DE LOS EVENTOS TORRENCIALES O POR LA REPENTINA FUSIÓN DEL MANTO DE NIEVE

En este apartado se plantea la hipótesis de que la cuenca hidrográfica está sometida a eventos torrenciales, y se analizan los efectos del bosque en la misma para dicha situación, prestando especial atención a los supuestos de eventos torrenciales extraordinarios. Ello implica analizar la incidencia del bosque en el comportamiento tanto en el ciclo del agua como en el ciclo de los sedimentos dentro de la cuenca hidrográfica. El tema es bastante complejo, por lo que se inicia abordando los aspectos relacionados estrictamente con el ciclo del agua (los caudales líquidos), para a continuación incorporar los efectos del bosque en el ciclo de los sedimentos, que está directamente vinculado con el fenómeno del geo-dinamismo torrencial, que aparece justamente cuando los eventos torrenciales inciden sobre la cuenca vertiente.

El geo-dinamismo torrencial lo integran ambos ciclos (el del agua y el de los sedimentos) y constituye un fenómeno que repercute en la cuenca con mayor intensidad y alcance, que lo que hipotéticamente se podría esperar si cada uno de los ciclos funcionara de manera aislada. Además sus efectos se intensifican cuando son provocados por eventos torrenciales extremos, afectando a la estabilidad de los terrenos de la cuenca y en la seguridad de sus habitantes y sus bienes.

2.1.1. Los efectos del bosque en la formación de los caudales líquidos y en la laminación de las avenidas

En la génesis de toda inundación siempre existe un proceso torrencial, que se inicia con el aguacero de tormenta, o con la fusión repentina del manto de nieve. La simulación de este fenómeno requiere conocer el hietograma para definir la precipitación de cálculo. A continuación se efectúa la estimación de la lluvia efectiva o neta a partir de esta precipitación de cálculo, para concluir con la generación del hidrograma del aguacero (Figura 2.2).

En el tránsito entre la precipitación de cálculo y la precipitación neta intervienen las características de la cuenca vertiente, entre ellas el uso del suelo o tipo de vegetación que ésta sustenta. Por tanto, la vegetación y por ende el bosque (que es el estado más desarrollado de la vegetación) influye en la generación de las inundaciones; al incidir en la formación de las precipitaciones efectivas y condicionar con ello la determinación de los caudales de aguacero, que en último término, dependiendo del tipo de tormenta que se trate, pueden llegar a causar las inundaciones.

Luego, si es posible modificar el uso del suelo en la cuenca vertiente, también lo es el influir en las avenidas y en consecuencia en las inundaciones; la cuestión radica en la medida en la que se consigue influir, tanto para el caso de las avenidas como para el de las inundaciones.

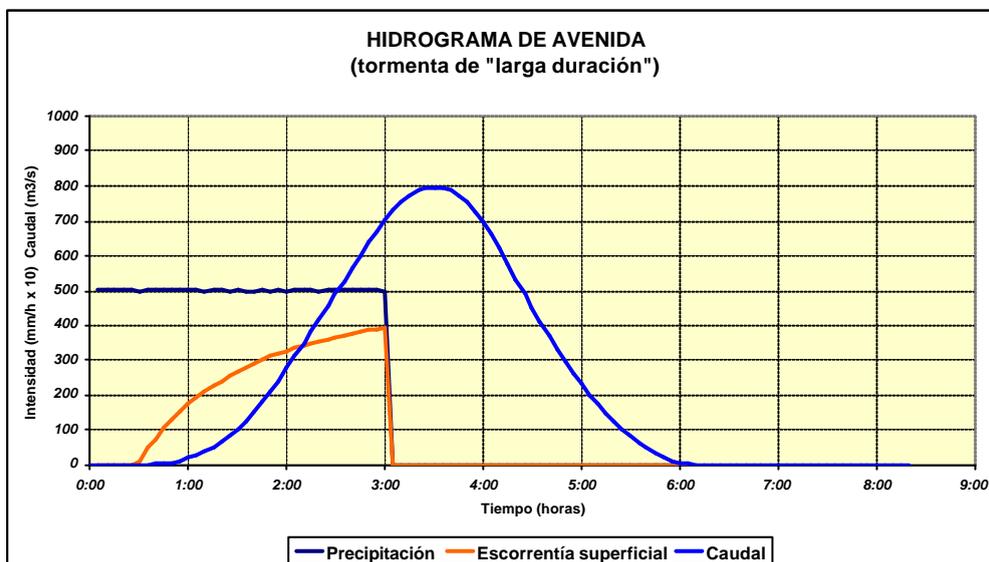
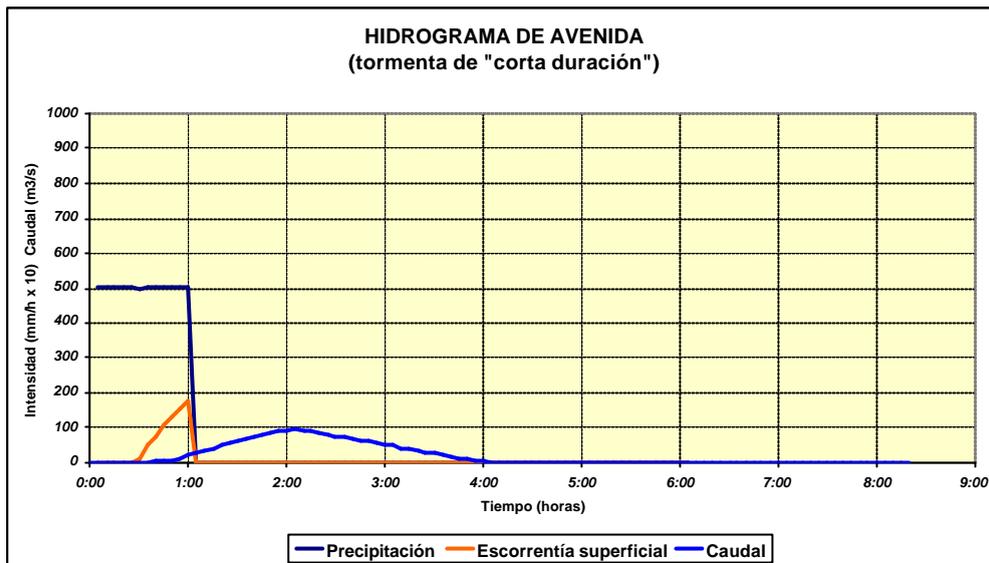


Figura 2.2. En el gráfico inferior se observa que conforme aumenta la duración de la precipitación disminuye la capacidad de infiltración del suelo, aumentando con ello la precipitación neta y el caudal punta generado por el aguacero.

La experiencia demuestra que tratándose de precipitaciones moderadas o de eventos torrenciales ordinarios, el bosque reduce significativamente tanto el volumen como el pico de avenida en el hidrograma de tormenta; pero para eventos torrenciales extremos, aunque dicha reducción sea consecuencia del mismo proceso físico que el que tiene lugar con los restantes tipos de precipitaciones, su efecto puede no ser lo suficiente como para modificar sustancialmente los caudales de avenida y, por tanto, no condicionar en la práctica el resultado final de las inundaciones.

En el contexto que se acaba de exponer, cuando la capacidad de retención de agua del bosque (tanto en su cubierta aérea como en su suelo) se satura, el retardo en la curva descendente del hidrograma de tormenta tiende a desaparecer y, tras alcanzar el hidrograma su caudal punta de avenida, éste tiende a perpetuarse, atenuándose únicamente por el efecto del tránsito de la avenida. En la práctica esta situación se

presenta ante la ocurrencia de precipitaciones torrenciales extremas y requiere además que el evento presente una cierta duración, tanto mayor cuanto mayor sea la superficie de la cuenca hidrográfica. En consecuencia, también resulta cierto que conforme aumenta la magnitud de la precipitación extrema, los efectos laminadores del bosque son cada vez menos revelantes (Figura 2.3).

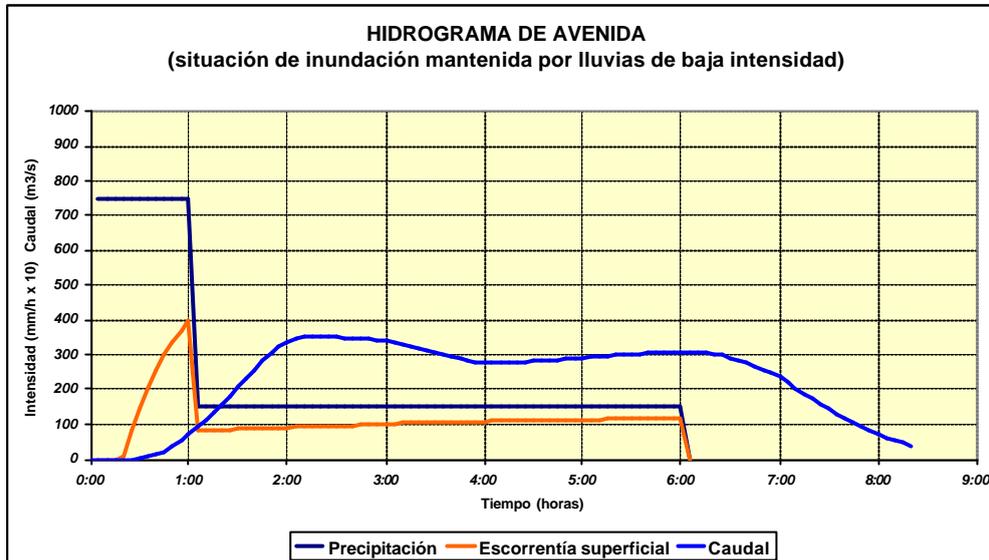


Figura 2.3. Hidrograma de un aguacero de tormenta, para una situación de inundación.

Otra cuestión a considerar es la repercusión que tiene la superficie de la cuenca vertiente en la generación de los hidrogramas. Analizando a éstos, por mera lógica se pone en evidencia que para grandes cuencas hidrográficas, que comprenden superficies muy extensas (por ejemplo, superiores a 100.000 Km²), los bosques tienen una influencia muy reducida o prácticamente nula en la laminación de las grandes avenidas y en consecuencia sobre las inundaciones causadas por las precipitaciones extremas. Pero para que esta hipótesis sea formalmente válida, se deben cumplir además dos premisas: 1) que la precipitación extrema tenga lugar a la vez en toda la cuenca o al menos sobre una superficie importante de la misma, lo que normalmente no es muy probable, pero puede ocurrir tratándose de ciclones o huracanes; 2) que realmente exista una proporción significativa de bosque en dicha cuenca (para que se pueda asegurar que éste influye), lo que salvo situaciones muy particulares tampoco es frecuente.

En consecuencia, resulta lógico admitir que en grandes cuencas hidrográficas el efecto de los bosques en la laminación de las avenidas presenta serias limitaciones ante precipitaciones torrenciales extremas, cuando éstas abarcan superficies importantes dentro de la cuenca y se prolongan en el tiempo.

Pero la situación es diferente tratándose de cuencas pequeñas (por ejemplo, inferiores a 100 Km²), pues en ellas el tiempo de concentración de la avenida está limitado por las características morfológicas de la cuenca, lo que a su vez reduce al tiempo punta del hidrograma de avenida, condicionando a que el caudal punta del hidrograma presente dos limitaciones: 1) la que se deriva de la propia morfología de la cuenca y 2) la que

resulta, en el caso de existencia del bosque, de la reducción aplicada a la precipitación de cálculo para convertirla en precipitación neta.

En estas condiciones el bosque puede jugar un papel fundamental, como ya fue señalado en la segunda mitad del siglo XIX por los ingenieros correctores de torrentes de los países montañosos de Europa, al afirmar: *no se puede corregir un torrente si al mismo tiempo no se restaura su cuenca vertiente*. En la práctica, para los citados ingenieros la restauración de la cuenca vertiente al torrente significaba la recuperación en ella del arbolado, básicamente mediante repoblación forestal. Entre los ingenieros de esta época que contribuyeron al conocimiento del comportamiento de los torrentes merecen ser citados entre otros a **Surrell**, que estableció un modelo de corrección de torrentes, y a **Belgrand**, que fue pionero en la toma de datos de campo para conocer la incidencia del arbolado en el ciclo del agua, a los que se referirá más adelante en repetidas ocasiones.

Pero no se debe olvidar que en las cuencas hidrográficas, cualquiera que sea su tamaño, ocurren multitud de eventos torrenciales ordinarios, para los que el bosque si puede tener efectos beneficiosos, regulando eficientemente las precipitaciones netas y transmitiendo sus efectos finales hasta la laminación de las inundaciones y, sobre todo, que estos eventos torrenciales ordinarios son mucho más frecuentes que los extremos.

Por todo lo expuesto, el bosque, aún con las limitaciones indicadas, se puede utilizar para tratar de controlar las inundaciones, pues condiciona la generación de las precipitaciones netas. Pero ante la pregunta *¿Puede resultar el bosque beneficioso, rentable o efectivo en el control en las avenidas?*. Las tres respuestas son diferentes:

1. Beneficioso, si por tal se entiende favorecer la vegetación natural, por supuesto que sí; pues ésta depende en cada estación de su clima y, si éste es propicio, su climax será el bosque.
2. Rentable es más discutible, porque obliga a un análisis económico de las posibilidades del bosque para el cometido en cuestión, lo que resulta complejo de estimar, además supone valorar los beneficios futuros de lo que supone mantener inmovilizado un recurso tan específico como el bosque; que por su propia esencia tiene unos turnos de vida muy largos; así como estimar los daños que con su desaparición se podrían causar.
3. Efectivo, pues si se trata de eventos torrenciales ordinarios puede y suele serlo; pero ante eventos extremos, si una vez saturados la parte edáfica y la cubierta aérea del bosque continúa la precipitación, su efectividad no está asegurada.

Sin embargo, los efectos del bosque en relación con las avenidas y las inundaciones, no se reducen únicamente a una moderación en el volumen de escorrentía y en el pico de la avenida generados por el evento torrencial (que en el caso de saturación total del suelo y de las partes aéreas de la vegetación puede no aportar ningún resultado práctico), como ya se ha expuesto. El bosque incide también en el control de la erosión del suelo en la cuenca, lo que repercute en la reducción de la carga en suspensión que transportan los cursos que drenan por la misma y en la disminución de la tensión cortante de la corriente que circula por ellos, lo que se puede traducir en una reducción del transporte sólido de fondo. Estos últimos aspectos (en los que se profundiza en el apartado siguiente) pueden ser tan importantes o más que la propia laminación del caudal líquido de avenida, sobre todo en cuencas torrenciales de montaña.

Además, el hecho que se reduzca el volumen del hidrograma de tormenta no implica que el volumen reducido se pierda como recurso hídrico; el mismo pueda llegar a la sección de salida de la cuenca como parte del caudal base en un periodo posterior. Asimismo, en grandes cuencas las pérdidas de agua por interceptación y transpiración de las masas arboladas, se pueden compensar en cierta medida con incorporaciones posteriores por condensación en la parte aérea del bosque, aunque por el momento la investigación no haya aportado pruebas suficientes ni para afirmarlo ni para negarlo.

2.1.2. Los efectos del bosque en la protección del suelo y en el control de los procesos geo-torrenciales que se desencadenan en la cuenca

Los efectos protectores del bosque ante el fenómeno de la erosión hídrica del suelo pueden mantenerse incluso con el suelo saturado; porque no dependen exclusivamente del efecto de las precipitaciones y del flujo de agua, sino que en dicho proceso interviene también la propia estructura física del bosque o, mejor dicho, del suelo forestal. Resulta evidente que los citados efectos irán decreciendo conforme se prolongue el tiempo del aguacero, pero conviene señalar que se trata de procesos diferentes aunque estén interrelacionados.

El suelo forestal resta energía cinética al movimiento superficial del agua sobre el terreno, al presentarle una mayor rugosidad para su circulación; asimismo los suelos forestales tienen una mayor porosidad que los agrícolas, lo que contribuye a una mayor retención del agua por infiltración. Por ambas razones, el agua dispone dentro del bosque de una menor capacidad para disgregar y transportar las partículas de suelo. Finalmente, el bosque también aporta un efecto de colchón protector al suelo ante el impacto de las gotas de lluvia.

En relación con la última cuestión, investigaciones recientes han puesto su atención en que el bosque puede contribuir a incrementar el volumen de la gota de agua que llega al suelo, con el consiguiente aumento lineal de su energía de impacto sobre el mismo; pero cabe advertir que en los bosques naturales (no alterados ni por el sobre-pastoreo ni por los aprovechamientos o talas abusivos) el efecto, que pudiera producirse por esta causa, se suele atenuar por la capacidad amortiguadora que ofrece el colchón de humus y hojarasca que se presenta en los perfiles edáficos superiores de los suelos arbolados (que se da en todos los climas, desde los templado fríos hasta los tropicales). Por tanto, si se quiere conservar la capacidad del bosque para proteger al suelo de la erosión hídrica, es necesario conservar su estructura tanto edáfica como de su parte aérea.

Los efectos del bosque en la conservación del suelo en la cuenca vertiente, ante la incidencia en ella de eventos torrenciales, cabe incluirlos como un episodio más del efecto del bosque ante las inundaciones. Pero en este caso, además de analizar el ciclo del agua, para llegar a determinar los caudales líquidos que circulan por los cursos que drenan por la cuenca; hay que considerar también el ciclo de los sedimentos para estimar los caudales sólidos que son puestos en circulación por las descargas líquidas, lo que implica estudiar el fenómeno global del geo-dinamismo torrencial. Éste comprende la erosión en la cuenca vertiente, el transporte de los sedimentos erosionados por los caudales líquidos que circulan por la red de drenaje de la misma y, finalmente, el depósito de los sedimentos incorporados a la corriente, cuando ésta pierde la energía necesaria para seguir transportándolos.

Al igual que ocurre con los caudales líquidos, el área de la cuenca vertiente representa un factor esencial, en la manera en la que en ella se desencadena el fenómeno del geodinamismo torrencial, diferenciando sustancialmente según se trate de pequeñas cuencas de montaña o de grandes cuencas fluviales. En las primeras, todas las fases del geodinamismo torrencial se manifiestan, o al menos se pueden manifestar, en un espacio reducido y en un corto periodo de tiempo, lo que le hace muy agresivo, además de presentarse con cierta frecuencia (períodos de retorno entre 10 y 25 años); mientras que en las segundas los distintos procesos del geodinamismo torrencial: erosión, transporte y sedimentación están mejor diferenciados espacial y temporalmente, y el geodinamismo torrencial, como una realidad conjunta, se presenta únicamente con ocasión de eventos torrenciales extremos y con periodos de recurrencia normalmente muy prolongados. Ante estas circunstancias, es lógico que la función protectora que realiza el bosque, generalizando cualquier cubierta vegetal, resulta muy diferente dependiendo del tipo de cuenca que se considere.

2.1.2.1. Los efectos del bosque ante el geo-dinamismo torrencial desencadenado en las pequeñas cuencas de montaña

Tratándose de las cuencas vertientes a los torrentes de montaña, el principal efecto que atribuyeron al bosque los ingenieros correctores de torrentes, fue el de su capacidad de sujeción y estabilización del suelo en las laderas ante las escorrentías. Por ello se justifica que se proyectara repoblar las cuencas vertientes a los torrentes y que, en las laderas que no fuera factible asentar la repoblación, se practicaran *faginadas* y *palizadas* (estructuras vegetales leñosas flexibles, normalmente del género *Salix sp*, que se instalaban en el suelo siguiendo curvas de nivel para que, tras enraizar y rebrotar, aumentaran la resistencia del terreno a la tensión de corte de la lámina de escurrido). Se trata de trabajos selvícolas que no tenían otra finalidad que la adoptada de estabilizar las laderas. Lo que queda claro de estas operaciones, es que se prefiere la vegetación leñosa frente a la no lignificada y dentro de la leñosa al arbolado. En realidad los principales problemas de erosión en las cuencas de montaña son muy específicos y en ocasiones graves, que se evidencian a modo de fenómenos en masa y deslizamientos.

Ante estos problemas, su corrección se debe asumir atendiendo a la dinámica de los propios torrentes. Por tanto, aunque éstos pudieran causar ocasionalmente inundaciones en los valles de montaña, el papel más relevante que se adjudica a la vegetación es el de la sujeción del suelo y de control de la descarga sólida que llega al torrente, más que el de una posible atenuación de la inundación, que por la propia dinámica torrencial, aunque se consiga atenuarla, siempre resultará súbita.

Conviene recalcar que cuando los ingenieros correctores de los torrentes de montaña se plantean en la segunda mitad del siglo XIX repoblar las cuencas alimentadoras de dichos cursos, su principal objetivo era asegurarse de este modo el mantenimiento y la efectividad a lo largo del tiempo de los trabajos de corrección realizados en los mismos. Por supuesto que se percataron del efecto del bosque (y de las cubiertas vegetales en general) en el ciclo del agua dentro de la cuenca vertiente y especialmente su incidencia en el control de la escorrentía directa, pero no se plantearon la generalización de sus resultados fuera del contexto de las áreas de montaña, donde los efectos podían comprobarlos. Para ellos la presencia del bosque era una medida necesaria para conseguir un efecto deseado: la corrección permanente de los torrentes de montaña. Esta filosofía se ha mantenido hasta el presente. Es cierto que en las últimas décadas se ha

cuestionado en alguna ocasión el modo de realizar ciertas obras y también se ha planteado, en los casos que resulta viable, la conveniencia de adecuar la corrección de los torrentes a criterios de reconstrucción morfológica y a la adecuación paisajística del entorno, pero siempre y cuando la seguridad de las obras quede debidamente garantizada y los objetivos a proteger estén perfectamente cubiertos.

En España la corrección de los torrentes de montaña y la restauración de sus cuencas vertientes recibe un fuerte impulso con los Reales Decretos de 3 de febrero de 1888, que se refiere a la organización de los trabajos de repoblación de las cabeceras de las cuencas hidrográficas de España, y de 7 de junio de 1901 que establece los Servicios Hidrológico-Forestales, orientados principalmente a la corrección de los torrentes de montaña. Las técnicas desarrolladas por los ingenieros españoles se inspiraron ante todo en las experiencias y en metodología francesa. El trabajo de los ingenieros franceses era conocido en el país entre los correctores de torrentes, siendo de destacar por su gran repercusión el texto de **Thiery**: *Restauration des montagnes, Corrections des torrents et Reboisement*, publicado en París (1891) y reeditado en París y Lieja (1914). Una parte importante de su contenido se refiere al análisis del torrente como un elemento singular en el ámbito de la dinámica del agua en cauces abiertos, sintetizando con gran maestría la necesidad de conjugar las obras hidráulicas de corrección en los cauces torrenciales, con la restauración de sus cuencas alimentadoras y proponiendo para estas últimas su repoblación forestal.

García Nájera, catedrático de la Escuela Especial de Ingenieros de Montes de Madrid entre 1949-70, es un profundo conocedor de la obra de **Thiery** y contribuyó a implementar algunos de sus contenidos. En este contexto desarrolló su ecuación de una corriente con arrastres, (como una forma sui generis de entender el flujo monofásico) y pensada como un procedimiento para determinar la pendiente de compensación (equilibrio) de un torrente, parámetro importante a la hora de plantearse su corrección, así como para describir el hipotético desarrollo geométrico de la formación de un cono de sedimentación. Todos estos conceptos los publica en su libro titulado *Principios de Hidráulica torrencial y su aplicación a la corrección de torrentes* (1943).

2.1.2.2. Los efectos del bosque ante el geo-dinamismo torrencial que se manifiesta en las cuencas fluviales

El geo-dinamismo torrencial no es ajeno a las grandes cuencas fluviales, pero, como ya se ha indicado, solo en circunstancias muy especiales, que coinciden con precipitaciones torrenciales extremas que afectan a una gran parte de la cuenca (que solo es previsible para largos periodos de retorno), sus efectos presentan la misma intensidad que en las pequeñas cuencas torrenciales. Cuando esto ocurre, se trata de situaciones que pueden clasificarse de desastre, cuando no de catástrofe.

En las restantes situaciones, aunque ocasionalmente se plantee el estudio conjunto de todos los procesos que integran el geo-dinamismo torrencial (erosión, transporte y sedimentación) aplicando modelos hidrológicos, es igualmente frecuente analizar los diferentes procesos por separado. Esta forma de operar proviene del pasado y responde a la búsqueda de soluciones concretas para problemas específicos, que normalmente se producen en ubicaciones determinadas de la cuenca. Por otro lado, al tratarse de grandes cuencas, los problemas específicos de cada zona toman especial importancia en la

misma, mientras que el geo-dinamismo torrencial en su conjunto queda desfigurado dentro de la cuenca para precipitaciones torrenciales ordinarias.

En este contexto, tiene sentido analizar, como un aspecto específico e individualizado, el problema causado por la erosión hídrica en cultivos y pastizales, cuando afecta a extensas superficies cuya productividad e incluso su propia existencia como sistemas productivos resulta amenazado. Planteamientos como éste tienen especial repercusión en las medidas de conservación de suelos y también lo han tenido en el pasado, por ejemplo en la segunda mitad del siglo XIX en España, cuando se planteó la recuperación de los espacios forestales, que se pensaban transformarlos para ponerlos en producción.

En la época mencionada y como consecuencia del traspaso de grandes propiedades forestales en manos de los Señoríos y de la Iglesia a manos privadas, favorecido por la política liberal del momento, extensas superficies arboladas fueron taladas y puestas de forma inmediata en producción agrícola, sin considerar las posibles repercusiones que tal medida pudiera acarrear. La consecuencia inmediata fue la aparición de importantes problemas de erosión hídrica en muchos de los predios en los que tuvo lugar la transformación, especialmente en los terrenos que presentaban mayores pendientes. La Administración reaccionó, se creó el Cuerpo de Ingenieros de Montes del Estado (1848), se paralizaron las ventas de las grandes fincas forestales y se planteó el mantenimiento y la restauración de los espacios forestales existentes, especialmente los montes públicos. Ello motivó la promulgación del Real Decreto de 11 de julio de 1877, que establecía en su articulado la repoblación forestal y mejora de los montes públicos, concebida para evitar la denudación de los suelos necesitados de protección. Aunque en los años siguientes 1888 y 1901 se promulgan dos nuevos Reales Decretos, centrados en la corrección de los torrentes de montaña y en la restauración de sus cuencas vertientes, siendo la labor de la Administración Forestal Española muy meritoria en este campo; en el ámbito científico-técnico de la cuestión nunca ha quedado lo suficientemente claro en nuestro país, la separación entre lo que representa el control de la erosión mediante la repoblación forestal de las áreas amenazadas por la erosión hídrica, de lo que supone la corrección de un torrente con la consiguiente restauración de su cuenca vertiente, utilizando para ello la repoblación forestal. En ambos casos se trata de controlar el movimiento del agua pero, incluso para eventos torrenciales extraordinarios, las diferencias son sustanciales; mientras en la corrección de torrentes la hidráulica torrencial desempeña el papel esencial en el sistema corrector; el control de la lámina de escurrido en las áreas sujetas a importantes procesos erosivos es fundamentalmente una cuestión hidrológica y dirigida básicamente a definir y establecer las técnicas más adecuadas para la conservación de suelos. A este respecto, cabe señalar que en su origen los estudios de erosión del suelo en áreas de cultivo no se enmarcaron específicamente en el ámbito de las cuencas hidrográficas, sino en el de la *conservación de suelos*, aunque se terminara por conjugar ambos aspectos.

Un problema similar al ocurrido en la España del siglo XIX, aparece en Estados Unidos entre los años veinte y treinta del siglo pasado. Terminada la primera contienda mundial en Europa (1914-18), se produjo un fuerte incremento en el precio de los alimentos, lo que animó a transformar en superficies de cultivo en un breve período de tiempo extensas áreas del centro de los Estados Unidos, anteriormente dedicadas en su mayor parte a pastizales y vida silvestre, utilizando para ello las facilidades que proporcionaba la moderna maquinaria de labranza de la época, que ya empezaba a ser pesada. Las

consecuencias no se demoraron y gran parte de las nuevas superficies de cultivo sufrieron los efectos de una erosión tanto hídrica como eólica en mayor o menor grado. Ante esta situación, la Comunidad Científica y la Administración norteamericana reaccionaron con rapidez, aportando a los labradores las recomendaciones y medidas pertinentes para subsanar en lo posible los nuevos problemas a los que se enfrentaban.

Bennett (1936) establece la primera *Clasificación Agrológica de Suelos*, redefinida con posterioridad en numerosas ocasiones y aplicada en todo el mundo con diferentes adaptaciones. En la Tabla 2.1 se muestra una versión simplificada y adecuada a la situación española de dicha *Clasificación*, que en su *Clase VII* dispone que para suelos poco profundos y de pendientes superiores al 35 % su destino compatible con su capacidad agronómica es el arbolado (conclusión que se asume plenamente cuando se trata de una agricultura subvencionada, pero es más difícil de asimilarla por una población sumida en una agricultura de subsistencia). Asimismo, a partir de 1935 se crea el **USDA Soil Conservation Service**, en el que **Wischmeier & Smith** investigan y publican en el transcurso de un largo periodo (son fundamentales las publicaciones de los citados autores de 1959, 1960, 1972, 1974) los fundamentos del modelo paramétrico **USLE** (*Universal Soil Loss Equation*) Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo.

Capacidad agrológica	Clase	Clima	Característica del suelo					Medidas de conservación	Observaciones
			Pendiente	Profundidad	Fertilidad	Laboreo	Erosión		
Apropiados para el cultivo	I	Permite como mínimo una cosecha anual sin barbecho	< 3 %	Muy profundo > 1,00 m	Muy buena	Fácil	Nula o no apreciable	No se necesitan. Atender a la fertilidad	Vegas. Suelos bien drenados y sin piedras.
	II	Permite como mínimo una alternativa cereal-leguminosa-barbecho	(3-7) %	Profundo 0,75-1,00 m	Buena	Fácil	Nula a ligera	Sencillas, cultivo a nivel, en fajas, etc.	Secanos muy buenos, bien drenados y con pocas piedras. Vegas con algún problema
	III	Idem	< 20 %	Mediano a profundo < 0,75 m	Regular puede llegar a mala	Presenta algunas dificultades	Ligera a moderada	Importantes: terrazas, drenajes, etc.	Buenos secanos a veces en pendientes altas. Drenajes suficientes
Admite el cultivo ocasional	IV	Permite como mínimo una cosecha con descanso	> 5 % (son frecuentes pendientes elevadas)	Mediano a poco profundo < 0,50 m	Regular, necesita largos descansos	Presenta dificultades	Moderada a fuerte	Importantes: terrazas, drenajes y barbechos	Cultivos ocasionales por razones sociales
Adecuados únicamente para pastos	V	Debe permitir vegetación aprovechable.	< 5 %	Superficial < 0,25 m	Regular a muy escasa	Solo vegetación natural	Ligera a moderada	No se aplican, pues no se cultivan	Páramos, áreas que se inundan o pedregosas, etc.
Adecuados únicamente para pastos y bosques	VI	Puede ser extremado pero debe permitir una vegetación aprovechable	< 35 %	Mediano a poco profundo < 0,50 m	Regular	No aconsejable	Moderada a fuerte	Importantes si se cultivan. Pastos; bosques	Áreas de vegetación permanente: pastos; bosque
	VII	aprovechable	> 35 %	Variable	Regular a escasa		Fuerte a acusada	Pastos; bosques	Áreas de bosque
No agronómicos	VIII	Todo tipo de limitaciones	Cualquiera	Cualquiera	Nula	-	De nula a acusada	No proceden	Áreas que no se aprovechan

Tabla 2.1. Adaptación de la Clasificación Agrológica de Suelos de Bennett a la situación del agro en España.

Retornando a la situación de España, en la década de los años cincuenta del siglo pasado el gobierno centró su interés en la regulación de los principales cursos fluviales del país, de características marcadamente estacionalidades, mediante un amplio programa de construcción de embalses. En este contexto, para garantizar la vida útil de los vasos de almacenamiento de dichos embalses, se redactaron unos proyectos de *restauración hidrológico-forestal* para sus cuencas alimentadoras, que posteriormente se llevaron a cabo (en la medida que fue posible), planteando para ello la estrategia e incluso las técnicas (especialmente las de selvicultura) que habían sido experimentadas con buenos resultados en la corrección de los torrentes de montaña. Evidentemente, en las áreas de cabecera de dichas cuencas de embalse, con problemas que requerían las clásicas medidas de corrección de torrentes, su aplicación aportó los resultados esperados. Pero en extensas superficies de estas cuencas, coincidentes en su mayor parte con sus áreas dominadas y dedicadas a cultivos, su principal problema consistía en resolver el control de la erosión hídrica en las mismas y para este modo limitar la emisión de sedimentos en suspensión a los embalses. Para resolver este problema, se propuso llevar a cabo repoblaciones forestales en todos aquellos terrenos con evidentes muestras de erosión hídrica, con pendiente del orden entre 30 y el 40% y por supuesto superiores.

Para llevar a cabo estas repoblaciones forestales, en terrenos muchas veces con cultivos ocasionales, había que expropiarlos; lo que obligaba justificarlo, aunque resultara evidente a simple vista que los mismos estaban sometidos a una erosión acelerada. La aplicación estricta en la España del momento (1950-60) de la *Clasificación Agrológica de Suelos* (**Bennett**, 1939), hubiera reducido las superficies de cultivo más de lo que socialmente resultaba recomendable, sin convencer a nadie de la utilidad de la medida. Ante este escenario **García Nájera** estableció y publicó su *Ecuación de la pendiente máxima admisible en cultivos* (1954) y *pastizales* (1955), a fin de demarcar las zonas que debían ser destinadas a vegetación permanente, preferentemente arbolada, para defenderlas de una erosión hídrica acelerada.

En síntesis, lo propuesto por **J. M. García Nájera** fue lo siguiente. De acuerdo con sus cálculos matemáticos y con los ensayos realizados en el canal de su laboratorio, estableció para los cultivos dos *pendientes críticas* a las que denominó: *pendiente de iniciación de la erosión* (para la que estableció un valor entre el 7 y 8 %) y *pendiente de arrastre total* (que lo determinó en un 18 %); mientras que tratándose de pastizales, sus cálculos puramente analíticos le llevaron a establecer que los *pastizales no debían extenderse por terrenos con más de un 30 % de pendiente*, si se quería asegurar la conservación de los mismos en buenas condiciones. Aunque los estudios de **García Nájera** fueran básicamente analíticos, únicamente ensayados en un canal de laboratorio, resultaban plenamente concordantes con las conclusiones de **Bennett**.

Basándose en dichos trabajos y en las recomendaciones de la FAO de la época, **López Cadenas de Llano & Blanco Criado** (1968) publicaron un texto, en el que establecieron los *índices de protección del suelo por la vegetación*, ampliando el valor de la *pendiente de iniciación de la erosión* hasta el 12 %. Implícitamente estos índices se utilizaron durante mucho tiempo en España, como un criterio para establecer las zonas prioritarias para la repoblación forestal en las cuencas vertientes necesitadas de restauración hidrológico-forestal. Dichos índices se muestran en la Tabla 2.2 y se trata

de valores relativos, que van desde 1,0 (máxima protección) a 0,0 (protección nula) y corresponden para cada tipo de suelo diferenciado dentro de la cuenca. En la Tabla 2.2 el grado de protección del suelo por las diferentes masas arboladas y por las vegetaciones arbustivas se define por un concepto claramente identificable, como es el de la *cabida cubierta*; mientras que en el caso de los pastizales los autores no dejaron nada establecido pero, por el contenido del texto en el que se describen dichos *índices*, se entiende por pastizal bien conservado el que cubre por completo al suelo y presenta una producción sustentable.

Tipo de Vegetación	Estado de la vegetación	Pendiente del terreno	Índices de protección
FORESTAL	Masas arboladas densas (cabida cubierta = 0,7)	Cualquiera	1,0
	Masas arboladas de cabida cubierta < 0,7 con sustrato arbustivo o herbáceo no degradado		1,0
	Masas arboladas de cabida cubierta < 0,7 con sustrato arbustivo o herbáceo degradado	3	0,4
		2	0,8
		1	1,0,
	Vegetación arbustiva no degradada	Cualquiera	1,0
	Vegetación arbustiva degradada	3	0,2
		2	0,6
		1	0,8
	Pastizales bien conservados	< 30 %	0,9
		> 30 %	0,6
Pastizales degradados	Cualquiera	0,3	
AGRÍCOLA	Cultivos agrícolas sin prácticas de conservación de suelos	3	0,0
		2	0,5
		1	0,9
	Cultivos agrícolas con prácticas de conservación de suelos	3	0,3
		2 y 1	1,0
NO PRODUCTIVO	Terrenos desnudos	3	0,0
		2	0,5
		1	0,9

1. Pendiente inferior al de *iniciación de la erosión*
2. Pendiente comprendida entre la *iniciación de la erosión* y la de *arrastre total*
3. Pendiente superior a la de *arrastre total*

Tabla 2.2. *Índices de protección del suelo por la vegetación elaborados por López Cadenas de Llano & M. Blanco Criado (1968) apoyados en los trabajos de García Nájera (1955-56) y en las recomendaciones de FAO.*

En el binomio 1993-94 se efectuaron unas experiencias de campo en una ladera forestal situada en el término municipal de Puebla de Valles (Guadalajara) a unos 160 Km. de Madrid, en el marco de un proyecto de investigación financiado por la CYCIT y dirigido por **Serrada & Mintegui**, con la intención de dar continuidad a los trabajos iniciados por **García Nájera** y seguidos por **López Cadenas & Blanco Criado** relativos a los *índices de protección del suelo por la vegetación*. El objetivo de dichas experiencias, que se efectuaron en unos canales que se montaron *ad hoc* sobre la propia ladera forestal y que tras las experiencias fueros desmontados, era proporcionar unos coeficientes hidráulicos conocidos para cada uno de los mencionados *índices* y conocer

in situ para que pendientes y con que lámina de escurrido se inicia la erosión en una ladera. El análisis e interpretación de los resultados de campo se prolongó hasta el año 2001 y durante este período el miembro del equipo **García Díaz** llevó a cabo una revisión de las publicaciones relacionadas con la investigación en cuestión, entre ellas las de los siguientes autores **Emmett** (1970); **Winberley & Crow** (1977); **Kao & Barfield** (1978, 1982); **Temple** (1980, 1982, 1983); **Engman** (1986) y **Jarret** (1990) y **I. Nezu & K. Onitsuka** (1999); además colaboró activamente en las experiencias de campo. Los resultados finales de la investigación se adjuntan a continuación.

Lecho	Ensayo	Caudal (m ³ ·s ⁻¹)	Calado (m)	Velocidad (m·s ⁻¹)	Manning	Froude	Reynolds
(pastizal)	1	0,0042	0,029	0,129	0,244	0,242	3.741
1(pastizal)	2	0,0151	0,046	0,293	0,143	0,436	13.478
1(pastizal)	3	0,0270	0,061	0,395	0,125	0,510	24.095
2(roza matorral)	1	0,0083	0,031	0,243	0,211	0,441	7.533
2(roza matorral)	2	0,0045	0,030	0,136	0,368	0,251	4.080
3 (jara)	1	0,0028	0,025	0,100	0,505	0,202	2.500
3 (jara)	2	0,0133	0,032	0,371	0,158	0,663	11.872
4 (matorral/pinar)	1	0,0031	0,019	0,141	0,190	0,326	2.679
4 (matorral/pinar)	2	0,0061	0,020	0,263	0,106	0,594	5.260
5 (pinar 1)	1	0,0086	0,023	0,389	0,075	0,819	8.947
6 (pinar 2)	1	0,0035	0,018	0,177	0,147	0,421	3.186

Tabla 2.3. Resultados de las experiencias realizadas entre 1993-94 en canales ad hoc emplazados en una ladera forestal situada en el municipio de Puebla de Valles (Guadalajara), para tratar de establecer un orden de magnitud de los números hidráulicos (Manning, Froude, Reynolds) a los índices de protección del suelo por la vegetación.

En la Tabla 2.3 la roza de matorral que aparece en los ensayos del lecho 2, en la práctica resulta asimilable a un pastizal, pues había empezado a brotar el matorral tras ocho meses de haberse realizado la roza y el tapiz vegetal existente no estaba aún lignificado, su estructura correspondía a la de un pastizal. En cuanto a la jara (*Cistus ladanifer*), de los dos ensayos del lecho 3, se trata de una especie de matorral de tallo alto, que deja al terreno muy poco protegido al ras del suelo y que botánicamente se le supone colonizador de los antiguos parajes ocupados por el *Pinus pinaster*. En realidad representa un matorral degradado en la Tabla 2.2 *índices de protección del suelo por la vegetación*. Por tanto puede observarse que los valores relativos de los citados *índices* se encuentran bien orientados.

En las Tablas 2.4 y 2.5 se advierte la posibilidad de utilizar la tensión de arrastre de la corriente τ como factor de iniciación de la erosión. Se comprobó en los ensayos de campo, que dicha tensión adquiere valores de inicio de una erosión importante para $\tau \geq 80$ (N/m²) como se muestra en la Tabla 2.4; posteriormente se trató de simular las tensiones que corresponderían a las pendientes significativas establecidas en la Tabla 2.2 (erosión tolerable: 12 %, erosión generalizada para cultivos agrícolas: 18 % y para pastizales: 30 %) que se definen en la Tabla 2.5. No se trata de ensayos concluyentes, pero aportan una información añadida para afianzar el contenido de los *índices* mencionados.

Se recuerda que todo lo expuesto sobre los índices de protección del suelo por la vegetación, se basa en el movimiento de la lámina de escurrido por una ladera. De acuerdo con esta visión, el espesor de la lámina de escurrido tiene una repercusión fundamental en el establecimiento de todos los límites. A este respecto en la Tabla 2.5 el calado de la lámina de agua en los ensayos resulta de entre 45-60 mm. Estos valores son muy altos y únicamente se pueden corresponder con situaciones de precipitaciones torrenciales extraordinarias o extremas. Esto es muy importante indicarlo, para tener en cuenta su significado en los planteamientos de ordenación agro-hidrológica de cuencas vertientes.

Lecho	Ensayo	Pendiente (m·m ⁻¹)	Vegetación	Calado (m)	Tensión de arrastre (N·m ⁻²)	Formación de regueros	Concentración de sedimentos (g·m ⁻³)
1	1	0,117	Pastizal	0,029	33,29	No	0,097
1	2	0,117	Pastizal	0,046	52,80	No	Sin datos
1	3	0,117	Pastizal	0,061	70,01	No	Sin datos
2	1	0,295	Roza-mat	0,031	89,71	No	1,920
2	2	0,295	Roza-mat	0,030	86,82	Sí	0,356
3	1	0,370	Jara	0,025	90,74	Sí	Sin datos
3	2	0,370	Jara	0,032	116,15	Sí	24,370
4	1	0,153	Mat-pinar	0,019	27,02	No	Sin datos
4	2	0,153	Mat-pinar	0,020	30,02	No	Sin datos
5	1	0,138	Pinar	0,023	29,78	No	Sin datos
6	1	0,155	Pinar	0,018	25,85	No	7,370

Tabla 2.4. Resultados de los trabajos efectuados entre 1993-94 en canales ad hoc emplazados en una ladera forestal situada en el municipio de Puebla de Valles (Guadalajara), para establecer los factores de iniciación de la erosión bajo diferentes cubiertas vegetales.

Tipo de lecho	Pendiente (m·m ⁻¹)	Interpretación de la pendiente	Calado (m)	Tensión de arrastre (N·m ⁻²)
Agrícola	0,12	Erosión tolerable	0,051	60,04
Agrícola	0,18	Erosión generalizada	0,045	79,46
Pastizal	0,30	Erosión generalizada	0,060	176,58

Tabla 2.5. Valores de la tensión de arrastre de la lámina de agua para las pendientes de erosión tolerable y de erosión generalizada en las áreas de cultivo y en pastizales bien conservados, en un intento de reconstrucción los resultados de las experiencias de **García Nájera**.

Pero al margen de las experiencias anteriores y con la intención de integrar los trabajos de ordenación agro-hidrológica de cuencas vertientes dentro de los esquemas adoptados por la comunidad científica para el tratamiento de las cuestiones abordadas en la misma, a partir de 1975 **López Cadenas** comenzó a aplicar en España del modelo paramétrico **USLE** (*Universal Soil Loss Equation*), desarrollado por **Wischmeier & Smith** (1959, 1960, 1972, 1974). La adaptación a una cuenca del modelo en cuestión,

permitió *definir la erosión potencial del suelo* en cada unidad homogénea de la misma; es decir, establecer para las diferentes zonas de la cuenca un valor de su erosión hídrica superficial potencial en ($t\ ha^{-1}\cdot a\tilde{no}^{-1}$). Por tanto, una vez definido un valor de tolerancia para la erosión del suelo, el modelo **USLE** permite mantener el esquema conceptual de los *índices de protección del suelo por la vegetación*, aportando además unos valores cuantitativos, donde anteriormente con los *índices* se limitaba a los aspectos cualitativos. Las formas prácticas que se adoptaron para presentar los resultados se detallan en la Tabla 2.6 y Tabla 2.7. La primera establece los grados de erosión en función de las pérdidas de suelo según el modelo USLE en cada una de las diferentes unidades homogéneas de la cuenca. La segunda plantea la ordenación de los usos del suelo en las diferentes superficies de la cuenca apoyándose en el citado modelo.

Perdidas de suelo (t/ha·año)	Código
A < 10	1
10 < A < 25	2
25 < A < 50	3
50 < A < 200	4
A > 200	5
Improductivo	0

Tabla 2.6. Grados de la erosión en las diferentes unidades homogéneas de una cuenca en función de las pérdidas de suelo en las mismas ($t\ ha^{-1}\cdot a\tilde{no}^{-1}$) según el modelo USLE.

Vocación del terreno	Código núm.	Uso actual del suelo
Terrenos Forestales	1	Compatible
	2	No compatible, es preciso mejorar la cubierta vegetal
Terrenos agrícolas	3	Compatible
	4	Compatible sólo si se llevan a cabo las prácticas de conservación de suelos pertinentes
	5	Incompatible, terrenos a recalificar
Improductivo	6	-

Tabla 2.7. Ordenación de los usos del suelo en las diferentes superficies de la cuenca según el modelo USLE

En los años siguientes se incorporó en los trabajos de ordenación agro-hidrológica de cuencas el modelo MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*) propuesta por **Williams** (1975), como una extensión del USLE para estimar los sedimentos emitidos por una cuenca vertiente durante un aguacero concreto; con lo que el modelo inicial se incorpora al ámbito de la circulación del flujo con sedimentos en cuencas hidrográficas y constituye un punto de referencia para la incorporación de subrutinas, relacionadas con el ciclo de los sedimentos, en posteriores modelos hidrológicos.

En un contexto diferente, pero también relacionado con la emisión de sedimentos por una cuenca hidrográfica, al comienzo de los años setenta también se extendió en España la aplicación del concepto de *degradación específica de una cuenca (DE)*, introducido a través de la publicación de **Fournier** *Le climat et la érosion* (1960) y que se define

como la *emisión de sedimentos por una cuenca expresada por unidad de superficie y tiempo* (normalmente, $t \text{ Km}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$) que encaja además conceptualmente con la preocupación de la época de mantener la vida útil de los embalses. Los valores aportados por este concepto, determinados al modo que estableció **Fournier** a través de sus rectas de regresión (*DE* en función del factor de agresividad del clima), se asumieron como un criterio a tener en cuenta. para establecer en primera aproximación el estado torrencial de una cuenca hidrográfica, especialmente para las de gran tamaño, pues al emplear en su cálculo únicamente parámetros climáticos, el resultado puede ser interpretado y, así se hizo, como el límite inferior de la *DE* de la cuenca.

En un ámbito más general, se vuelve a insistir en el diferente comportamiento de los cursos fluviales respecto de los torrenciales en relación con la emisión de sedimentos. Los grandes ríos, que se alimentan de extensas cuencas hidrográficas, descargan entre el 85-90 % de los sedimentos en suspensión y el resto como transporte de fondo; mientras que en los torrentes y ríos de montaña la descarga sólida se puede repartir en partes iguales entre sedimentos en suspensión y el transporte de fondo y, en general, el reparto resulta muy variable. Ello explica la estabilidad de la carga sólida en los grandes ríos respecto de los pequeños cursos, especialmente los torrentes de montaña, y la mayor necesidad de protección de las cuencas de estos últimos. **Fournier** (1960), tras analizar la emisión de sedimentos en los principales ríos del planeta, llegó a la conclusión que la degradación específica de sus cuencas vertientes en la práctica dependía en exclusiva del clima.

Durante los años noventa se extendió también la utilización del modelo *RUSLE* (*Revised Universal Soil Loss Equation*), que bajo un punto de vista agronómico tiene notables prestaciones, pero en el ámbito de la primera ordenación de una cuenca hidrográfica su contribución se reduce; no porque el modelo no sea potente, sino porque su aplicación real está pensada para fincas muy desarrolladas y en cualquier cuenca del mundo hay fincas de todo tipo, predominando las que pueden mejorar su nivel de tecnología. Además, aunque todas las fincas de la cuenca hidrográfica estuvieran altamente tecnificadas, siempre quedaría por resolver el problema hidráulico de la circulación de la corriente por los cursos que drenan por la cuenca en los momentos de avenidas; razón por la cual los modelos hidrológicos desempeñan una función importante en la planificación de las cuencas hidrográficas.

La utilización de los modelos hidrológicos con fines de ordenación de cuencas hidrográficas iniciamos en la unidad de Hidráulica e Hidrología de la E. T. S. de Ingenieros de Montes de la UPM a partir de 1985, estableciendo una *metodología integrada para la determinación de los sedimentos aportados por una cuenca*, que se elaboró apoyándose en modelos ya existentes. Dicha metodología (que se muestra en la Figura 2.4 en su versión final de 1994) fue revisándose en años sucesivos hasta que **Robredo** (1993) le dotó de un programa informático llamado CAUDAL 3 para su manejo. Consta de un modelo hidrológico integrado convencional, que se representa verticalmente en el lado izquierdo de la figura y de la aplicación del modelo USLE en la cuenca analizada, que ocupa el centro y el lado derecho de la misma. La aplicación del modelo USLE permite planificar el uso del suelo en la cuenca para una primera aproximación, lo que se recoge en la tabla final situada a la derecha de la figura.

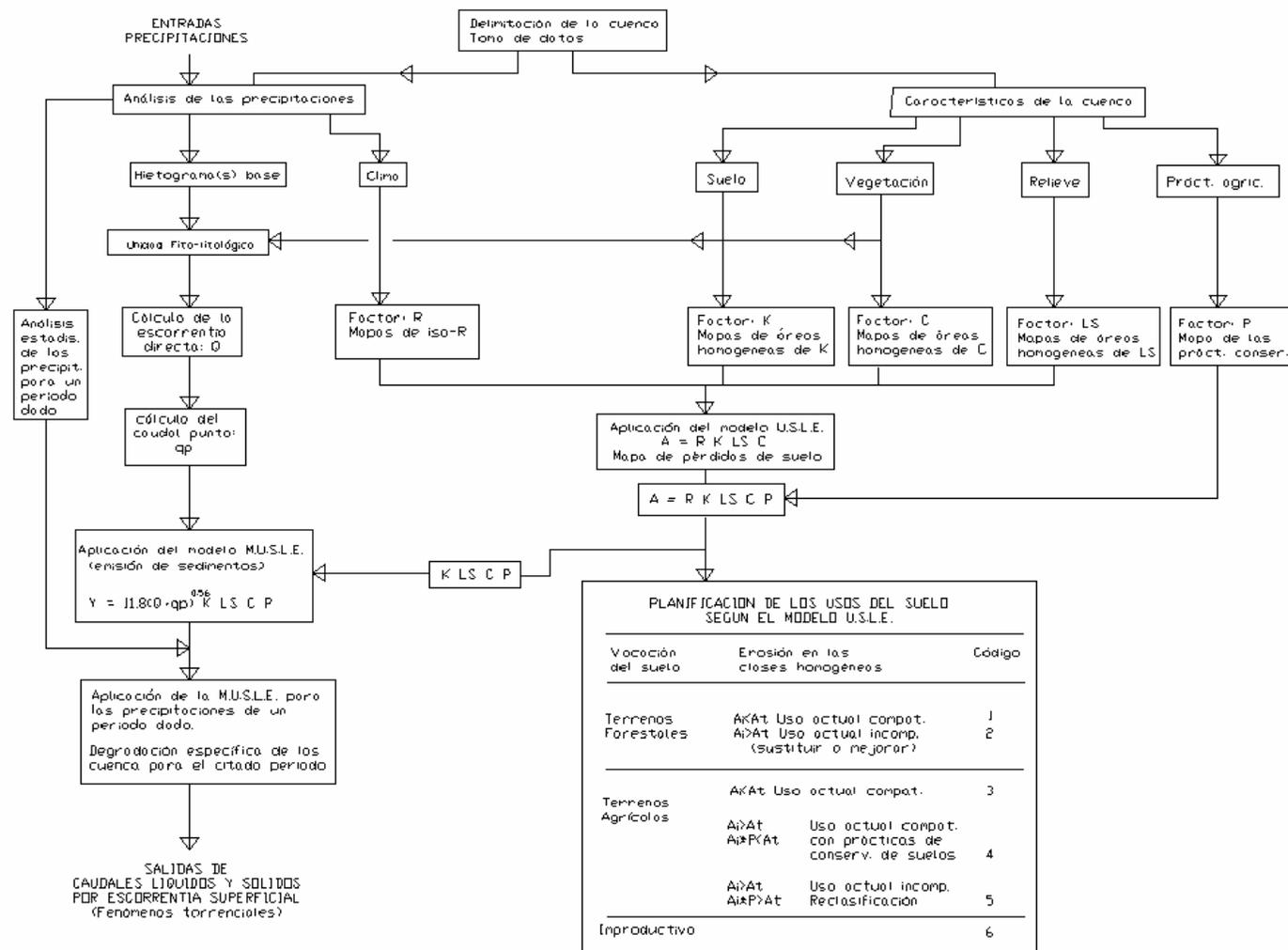


Figura 2.4. Esquema de la metodología integrada para la determinación de los sedimentos aportados por una cuenca (1994)

La metodología en cuestión, al incluir un modelo hidrológico integrado en su estructura, permite evaluar los caudales de avenida que pasan por la sección final o de salida de la cuenca, para diferentes precipitaciones de tormenta. Además, al integrar en la misma el modelo paramétrico MUSLE, también estima la emisión de sedimentos en suspensión por la cuenca en cada avenida, utilizando los parámetros hidrológicos de ésta y los valores de los coeficientes K (factor erosionabilidad del suelo), L·S (factor topográfico), C (factor cultivo o factor vegetación) y P (factor prácticas de conservación de suelos) de la cuenca.

En resumen, la metodología en cuestión permite determinar para las avenidas de tormenta sus caudales líquidos (Volumen de escorrentía: Q , m^3 ; Caudal punta o al pico: q_p , $m^3 s^{-1}$) y la emisión de sedimentos en suspensión: Y , t; en consecuencia está preparada para analizar las avenidas y por ende las inundaciones en una primera aproximación.

La metodología tiene en cuenta la existencia de las cubiertas arboladas en la cuenca, en la determinación del caudal de las avenidas y en la estimación de los sedimentos en suspensión emitidos por ellas; ya que en su desarrollo se incluyen cuatro mapas temáticos de la cuenca: 1) el clinométrico; 2) el de superficies de igual índice de erosión pluvial; 3) el de litofacies y 4) el del uso del suelo o de vegetación de la cuenca. En este último aparecen las superficies arboladas, que transmiten su peso en la definición del Número de Curva de la cuenca y de este modo interviene en el valor de la precipitación neta; pero también contribuye en la estimación del factor C del modelo USLE, que contribuye a estimar la emisión de sedimentos en suspensión por la cuenca.

Aunque la metodología es de estructura bastante sencilla, se planteó con el objetivo de poder obtener con ella la mayor información posible que se requiere para la ordenación y restauración hidrológico-forestal de una cuenca hidrográfica; tales como: 1) El grado de erosión superficial en las diferentes zonas de la cuenca en la situación inicial y tras las operaciones de restauración hidrológico-forestal; 2) La ordenación de la cuenca utilizando el modelo USLE, representando cartográficamente los usos adecuados del suelo en cada zona y 3) Los efectos previsibles de conseguir con la restauración hidrológico-forestal de la cuenca.

En relación con el epígrafe 3) en el mismo se incluye:

- a) Desde una representación cartográfica de cómo se estima la reducción de la erosión superficial en las diferentes zonas de la cuenca en que se ha intervenido con las repoblaciones forestales proyectadas en la restauración hidrológico-forestal (en adelante H & F), para las diferentes etapas de consolidación de las mismas, en definitiva del proyecto.
- b) Hasta la evolución de los parámetros hidrológicos Q (m^3) y q_p ($m^3 s^{-1}$) y de los valores de estimación de la emisión de sedimentos en suspensión por la cuenca Y (t) en la cuenca, en función del estado físico de ésta en las distintas fases en las que los trabajos de restauración H & F efectuados en la misma se consolidan, surtiendo los efectos de protección previstos en el proyecto o el grado de cumplimiento de los mismos.

En definitiva, el modelo permite estimar de una forma visual y cuantitativa la evolución que pueden experimentar los caudales líquidos de una avenida Q (m^3) y q_p ($m^3 s^{-1}$) y su

correspondiente emisión de sedimentos en suspensión por la cuenca Y (t), en los momentos siguientes: *a)* de redacción del proyecto de restauración H & F; *b)* tras la realización de éste y *c)* en las diferentes fases de consolidación del mismo. De este modo se puede prever cuantificando los efectos de la restauración H & F (cuyo componente principal es la repoblación forestal de las áreas más vulnerables a la erosión de la cuenca), para cada una de las avenidas que tengan lugar en la cuenca, sean ordinarias o extraordinarias y deducir las consecuencias pertinentes.

Por todo lo dicho, un aspecto muy importante de estos proyectos de restauración H & F es su seguimiento una vez realizados, porque es la única manera de conocer su grado de cumplimiento, lo que obliga a un trabajo de revisión y de adecuación.

Si se vuelve a plantear la pregunta *¿Puede resultar el bosque beneficioso, rentable o efectivo en el control del geo-dinamismo torrencial?*. Las tres respuestas apuntan hacia matices afirmativos:

1. Beneficioso lo es siempre, porque el bosque (sobre todo si está bien conservado) reduce la erosión del suelo y con ello disminuye la emisión de sedimentos, además del control que ejerce sobre la laminación de la lámina de escurrido; por lo que contribuye a moderar los procesos del geo-dinamismo torrencial.
2. La rentabilidad obliga a un análisis económico de las posibilidades del bosque para el cometido en cuestión, así como el coste de los beneficios que puede aportar en tal sentido, en relación con la inversión que supone mantener el propio bosque. Aunque todo esto es muy complejo, los beneficios del bosque en relación con el control del geo-dinamismo torrencial son manifiestos y, tanto más, cuanto el bosque cubre los terrenos de mayores pendientes situados en áreas dominantes de la cuenca, donde agrónicamente representa la mejor opción de uso; por lo que se puede considerar que el bosque en una primera aproximación es rentable como regulador del geo-dinamismo torrencial.
3. Efectivo, pues si se trata de eventos torrenciales ordinarios lo es. Ante eventos extremos, aunque siempre resulte beneficioso, puede no llegar a ser totalmente efectivo, pero en cualquier caso contribuye a moderar la emisión de sedimentos durante las inundaciones y con ello evita en mayor o menor grado los procesos geo-torrenciales asociados a las mismas.

Para completar este apartado se comentan algunas cuestiones en relación con la vegetación de riberas. Su uso es normalmente conveniente: *a)* porque evita un importante aporte de sedimentos directos al cauce procedentes de sus vertientes laterales directas y *b)* incrementa la resistencia de los márgenes del cauce a la abrasión producida por la tensión tractiva de la corriente en avenidas ordinarias. Ambos efectos contribuyen a la protección del cauce y a mejorar la calidad de las aguas. Lógicamente la vegetación de riberas, como cualquier otra, tiene su consumo de agua; pero sus efectos beneficiosos ante avenidas torrenciales ordinarias compensan su mantenimiento. Tratándose de avenidas torrenciales extraordinarias, sus efectos positivos se limitan y es preciso prever los problemas que se puedan generar en el caso de que la corriente lo arranque y a continuación lo arrastre aguas abajo; por lo que es conveniente tenerla controlada, manteniendo especies de raíces pivotantes que presenten una buena sujeción al terreno y atendiendo a la edad y al estado sanitario de vegetación, para evitar posibles taponamientos en secciones del cauce aguas abajo, en las que se podrían acumular los

residuos vegetales, sobre todo los que presentan tañamos apreciables. A este respecto se remite al lector al documento repartible **D22 *El control de detritos leñosos y el manejo de la vegetación en el cauce*** (*Best practice guidelines for dealing with large wood debris*) redactado por **Lenzi M. A.; Comiti F.; Mao L.; Andreoli A.; Pecorari E.; Rigon E. y Picco L.** del equipo del Proyecto EPIC FORCE de la Universidad de Padua (Italia).

2.1.3. Los efectos del bosque en el control de los fenómenos nivales

El bosque de montaña hasta la altitud a la que consigue instalarse (timber line) por las limitaciones que le imponen las condiciones climáticas y edáficas, desempeña un papel hidrológico y de protección del suelo en la cuenca vertiente de primer orden; pero además contribuye de varias formas a la estabilidad del manto de nieve, contribuyendo con ello a prevenir el desprendimiento de aludes.

Los aludes sobrevienen cuando, debido a una inestabilidad local, se produce una rotura en el equilibrio del manto de nieve en la montaña, desencadenando un deslizamiento ladera debajo de grandes masas de nieve en ocasiones a velocidades muy elevadas.

El bosque de montaña contribuye de varias formas a la estabilidad del manto de nieve:

- a) Sus troncos constituyen excelentes puntos de anclaje al terreno que frenan la reptación de la nieve.
- b) En el momento de la nevada, sobre todo en los bosques de hoja perenne, las copas conservan una gran parte de la nieve, que solamente cae después de empezar la metamorfosis destructiva.
- c) La cubierta forestal atenúa los efectos del enfriamiento, lo que conduce a una metamorfosis más rápida que en el terreno descubierto.

En relación con el apartado anterior *c)* el bosque genera un microclima en su interior, de manera que las temperaturas dentro del mismo pueden ser superiores a las del exterior durante el invierno y viceversa durante el verano, lo que afecta a la metamorfosis del manto de nieve retenido dentro de él (es decir, en las transformaciones internas que experimentan los cristales de las distintas capas que forman el manto de nieve durante el invierno, debido a las variaciones de los gradientes de temperatura que experimenta dicho manto de nieve a lo largo del mismo y a la incorporación de agua líquida al comienzo de la primavera o periodo de fusión).

El bosque impide el desprendimiento de aludes, por tanto se le considera una medida de protección activa frente a su riesgo. Pero normalmente es incapaz de frenarlos, una vez que se han desprendido, sobre todo si se trata de aludes de nieve en polvo o aludes explosivos, que se desprenden de las áreas superiores sin vegetación, destruyendo cuanto se oponga a su recorrido, incluido al bosque.

Para altitudes superiores al bosque, en los pastizales de montaña la primera nieve se adhiere mejor al terreno, si el ganado ha pastado ya en ellos; porque la hierba rasa hace el efecto de *alfombra cepillo*, mientras que las hierbas largas se inclinan bajo el peso de la nieve y ofrecen una superficie lisa favorable al deslizamiento. En los matorrales de montaña la nieve penetra entre los numerosos huecos que presenta su estructura vegetal, lo

que impide que se forme una buena adherencia de la nieve al terreno y de las capas del manto de nieve entre sí, favoreciendo con ello su deslizamiento.

En cuanto a la influencia del bosque en el periodo de fusión del manto de nieve, **Andréassian** (2004) se refiere a las experiencias de **Bates & Henry** (1928) en Wagon Wheel Gap y a los de **Troendle & King** (1985) en Fol Creek, que comprobaron que la deforestación adelantó la fusión de la nieve (en un promedio de 12 y 7,5 días respectivamente), lo que fue interpretado porque la tala avanzó la fusión debido al derretimiento más temprano fuera de la cubierta forestal; lo que unido al consumo más bajo de agua, por falta de vegetación, permitió una recarga más rápida del suelo. Pero es posible también que en el derretimiento más rápido de la nieve en un suelo desnudo contribuya la metamorfosis de fusión o de primavera.

2.2. LA REPERCUSIÓN DE LAS CUBIERTAS ARBOLADAS EN LAS DISPONIBILIDADES HÍDRICAS DE LA CUENCA VERTIENTE EN LOS PERIODOS QUE TRANSCURREN ENTRE EVENTOS TORRENCIALES CONSECUTIVOS

Al analizar en el apartado anterior los efectos del bosque en el control de las inundaciones y del geo-dinamismo torrencial, implícitamente se han tenido en cuenta las ecuaciones del movimiento del agua en la cuenca vertiente, es decir, la ecuación de continuidad y la ecuación de la dinámica; pero en ningún caso se ha planteado la posibilidad de que el bosque pueda tener influencia alguna sobre las precipitaciones. Tampoco se ha planteado si las necesidades hídricas de la vegetación debieran condicionar la planificación del uso de las cubiertas arboladas, con la finalidad de proteger a la cuenca vertiente ante el geo-dinamismo torrencial.

Sin embargo, ambas cuestiones han sido objeto de estudio y discusión por la comunidad científica desde un pasado lejano y aún siguen siendo tema de controversia. A ellas se referirá en este apartado y a propósito de las mismas, cabe plantearse las siguientes preguntas:

1. ¿Pueden las grandes superficies arboladas modificar el microclima de una región?
2. ¿Merece la pena utilizar el bosque en la cuenca hidrográfica como regulador de las inundaciones y del geo-dinamismo torrencial, dando por sabido que el bosque representa una descarga importante de agua hacia la atmósfera por transpiración e interceptación, que supone una pérdida importante de los recursos hídricos en los periodos entre eventos torrenciales, especialmente durante las sequías?

La primera de las preguntas ya motivó numerosas controversias al comienzo del siglo XIX en Francia, entre los partidarios de las dos fracciones que **Andréassian** (2004) los denomina: *naturalistas* o *selvicultores*, defensores de la influencia del bosque en el microclima de una región, e *ingenieros* que lo ponían en duda; controversia que en cierta medida se ha mantenido hasta el presente. La segunda responde más a los planteamientos de la investigación actual, aunque en parte entronca con el dilema mencionado.

2.2.1. La relación clima-bosque. Controversias entre los principios asumidos por los naturalistas y la necesidad de pruebas para corroborarlos

Continuando con **Andréassian** (2004), el vacío de autoridad que se produjo al comienzo de la Revolución Francesa (1789), provocó que extensas superficies de arbolado del país, hasta entonces propiedad del rey, la nobleza o la Iglesia fueran requisadas o se vendieran y los nuevos propietarios los talaran, causando una profunda deforestación. En la primera mitad del siglo XIX un grupo de *naturalistas*, entre los que destacan **Rauch**, **Lamarck** y **Boussingault** y a los que al final del periodo se une **Becquerel**, argumentaron que las intensas sequías, seguidas por inundaciones, que asolaron a Francia durante el periodo en cuestión, se debían a la deforestación que se había producido en el país desde el final del siglo XVIII.

Ante esta posición la fracción de los *ingenieros*, exigieron que las argumentaciones planteadas se probaran con mediciones al efecto. Entre ellos destaca **Surrell**, por ser el autor de la *teoría del control de torrentes* (1841), que en síntesis es la recogida en el apartado precedente, y por su tono de moderación; **Surrell** reconocía el papel del arbolado en el control de los torrentes, pero no era partidario de extender su influencia más allá de esta cuestión; pero contribuyó a que el Parlamento de Francia aprobara la primera Ley de Reforestación de Montes (1860), a la que siguió la Ley de Planificación de Montes (1864) y más adelante la Ley de Rehabilitación y Conservación de Suelos en las áreas de montaña (1882), que proveyeron de un marco legal a Francia en lo que se refiere a la conservación de tierras de montaña, que sobrevive hasta la actualidad. Junto a él están **Belgrand**, que fue el primero en organizar mediciones hidrométricas comparativas, para evaluar el impacto hidrológico de las masas forestales (1850-52) y cuyos resultados publica un año más tarde; **Vallès**, **Champion** y **Cèzanne**.

Más tarde también los selvicultores se plantean realizar mediciones y entre los que las realizan están **Jeandel**, **Cantégril** y **Bellaud** (1858-59) publicados en 1862 y **Mathieu** (1867-1877) publicados en 1878. Las controversias llegan a su máximo exponente al final del Tercer Imperio (1865-70) y terminan con él, sin otra resolución que la de la necesidad de mediciones cuyos resultados sirvan de pruebas para las hipótesis planteadas. Pero el debate francés se trasladó a los Estados Unidos a través de **Pinchot** que fue su primer director del Servicio de Bosques (1905), que había estudiado en la Escuela Forestal de Nancy y adoptó una postura moderada dentro de los ingenieros.

Las mediciones realizadas en cuencas hidrográficas por **Belgrand** (1853), **Jeandel et al.** (1862), que se han comentado, a los que se añade las de **Engler** (1919) efectuadas en las cuencas suizas de Sperbelgraben y de Rappengraben desde 1900 (**Mc Culloch & Robinson**, 1993), se plantean y realizan en cuencas con cubiertas muy variadas de arbolado y por tanto no estaban en disposición de aportar una respuesta definitiva al impacto hidrológico del bosque; pero abrieron el camino al diseño de las experiencias en *cuencas comparadas* y con ello de la posibilidad de conocer mejor la influencia del bosque en el ciclo del agua. Al respecto conviene señalar que las *cuencas comparadas* suponen una importante restricción respecto del encuadre inicial planteado por los naturalistas franceses en los inicios del siglo XIX, que pretendían establecer la interrelación o influencia directa entre los bosques de una región y su clima. Las experiencias en *cuencas comparadas* se reducen a medir y predecir la influencia del arbolado (y de la vegetación en general) en el ciclo del agua.

Pero la controversia francesa del siglo XIX, anteriormente comentada, tuvo su revisión en la primera mitad del siglo XX, entre los que propugnaban que el bosque favorece el incremento de las precipitaciones, representado por **Zon**, y los que por el contrario, siguiendo la línea de **Pavari**, se inclinaban por eludir dicha influencia, pero resaltaban la importancia del mismo en la conservación del suelo y en el equilibrio del régimen hidrológico (**López Cadenas de Llano & Blanco Criado**, 1978). La polémica llegó al *Symposium sobre Hidrología Forestal de la Universidad de Pensylvania* (1965), que finalizó, como era de prever, sin una verdadera clarificación, pero en la misma **Penman** resaltó un aspecto muy significativo, al plantear que para que existan precipitaciones no es suficiente con la existencia de una masa de agua en la atmósfera (a la que el bosque puede contribuir por mayor grado de transpiración), sino que también se tiene que producir las condiciones necesarias para su condensación.

Un trabajo minucioso en relación con el papel de los bosques en el régimen hidrológico, al margen de los experimentos en *cuencas comparadas*, pero que merece ser atendido por el rigor de su planteamiento y la profusión de información que aporta al respecto, es el realizado por **Molchanov**, recopilado en su publicación *The hydrological role of forest - El papel de los bosques en la hidrología-* (1960, traducción al inglés 1963), en el que analiza sus experiencias en los bosques rusos.

2.2.2. Las experiencias en cuencas comparadas

Adréassian (2004) en un importante trabajo de revisión menciona que el diseño de las *cuencas comparadas* se adopta por primera vez entre 1910-26 en *Wagon Wheel Gap* (montañas del Colorado) por **Bates & Henry** (1928), siendo sus trabajos rápidamente asumidos y continuados por hidrólogos y forestales. El principio de las cuencas comparadas es sencillo, aunque conmocionó las referencias existentes sobre Hidrología Forestal, marcando una nueva línea de investigación (**Hewlett**, 1971, 1982; **Cosandey**, 1995, etc.). Su fundamento se basa en seleccionar dos cuencas vertientes tan similares como resulte posible, lo que permite suponer que ambas tendrán una reacción similar ante las incidencias climáticas; pero inevitablemente cada cuenca presenta sus propias peculiaridades, por lo que se requiere monitorizar ambas durante un determinado periodo para entender sus diferencias. Hipotéticamente el periodo preliminar de calibración debe ser lo suficientemente prolongado, para conseguir una caracterización completa de ambas cuencas.

Al final del periodo de calibración, se modifica el uso del suelo en una de las cuencas (*cuenca de tratamiento*), permaneciendo inalterable en la otra (*cuenca de control*). La relación entre las cuencas antes del tratamiento se utiliza para reconstruir el flujo de los cursos en la cuenca tratada, lo que permite valorar el impacto del tratamiento en mm de precipitación o en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ de flujo. Las hipótesis del diseño experimental son:

- a) Las dos cuencas deben ser muy similares y con un alto comportamiento correlativo.
- b) Ambas cuencas deben estar geográficamente cerca, para asegurarse que están sujetas a las mismas variaciones climáticas.
- c) La *cuenca de referencia* debe permanecer inalterada en todo el periodo de estudio.

De este modo se aporta a las experiencias efectuadas en cuencas comparadas una *invariabilidad entre cuencas* y una *invariabilidad del clima* que no existía en los

experimentos anteriores. En la presentación de los resultados **Adréassian** mantuvo el modo adoptado por **Bosch & Hewlett** (1982) en un trabajo considerado como clásico, a los que agregó los resultados publicados en los 20 años posteriores. De este modo llegó a considerar un total de 137 experimentos en cuencas comparadas, 115 referentes a deforestación y 22 a reforestación o repoblación. Los resultados de las investigaciones se muestran en las Figuras 2.5 y 2.6.

A la vista de los gráficos de las Figuras 2.5 y 2.6 es obvio que la deforestación aumenta las escorrentías (que para los autores representan caudales anuales disponibles, a los que también denominan cosechas de agua), mientras que la repoblación lo disminuye; pero también es obvio que los resultados son extremadamente dispersos.

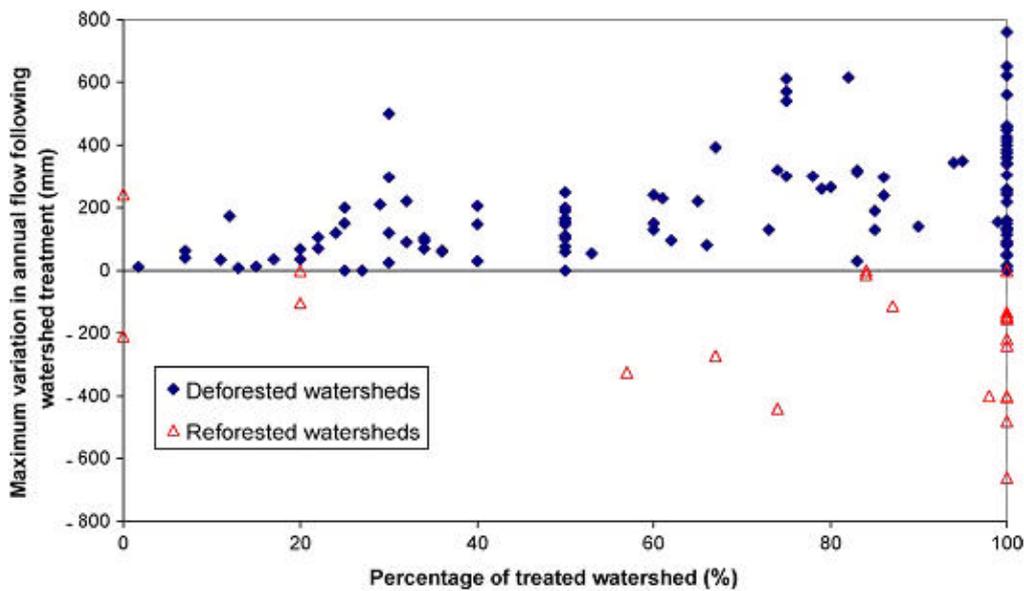


Figura 2.5. Máxima variación anual de la escorrentía (mm) en función del porcentaje de la cuenca sujeta a tratamiento.

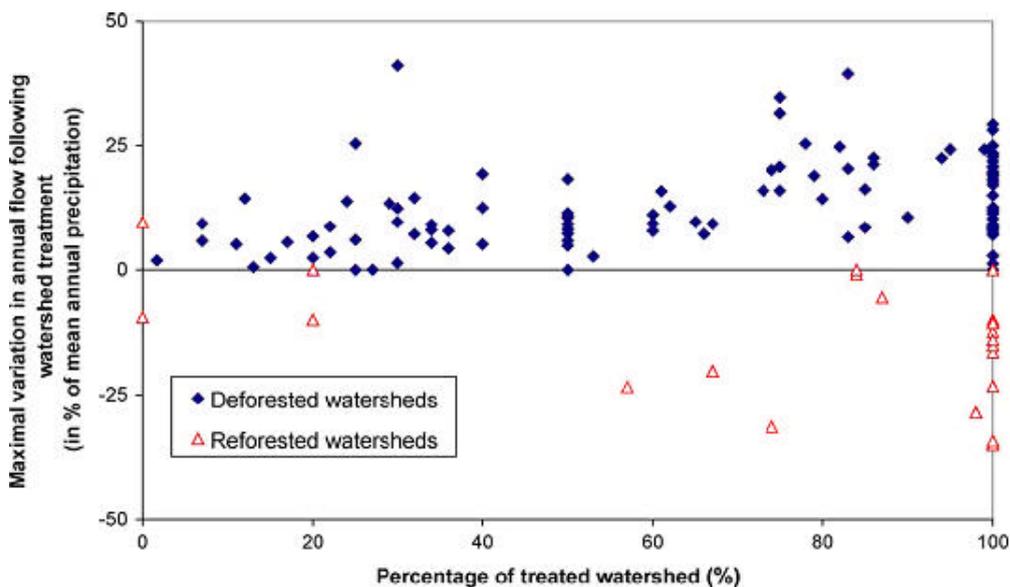


Figura 2.6. Máxima variación anual de escorrentía, en % de precipitación, en función del porcentaje de la cuenca sujeta a tratamiento.

Es muy importante señalar que el análisis se plantea para lluvias normales, que no dan lugar a los efectos derivados del geo-dinamismo torrencial que causan las precipitaciones torrenciales, especialmente las extraordinarias.

Además al modo de presentación de los resultados se le podían hacer algunas observaciones:

- Resulta difícil interpretar el verdadero sentido de la máxima variación anual, ya que depende del volumen de precipitación anual en los años posteriores al tratamiento.
- El impacto del tratamiento no es estable en el tiempo para la mayor parte de las experiencias en cuencas comparadas.

Para mejorar la interpretación del impacto del tratamiento **Hibbert et al.** (1975) propusieron comparar la relación precipitación/escorrentía antes y después del tratamiento, como se muestra en la Figura 2.6.

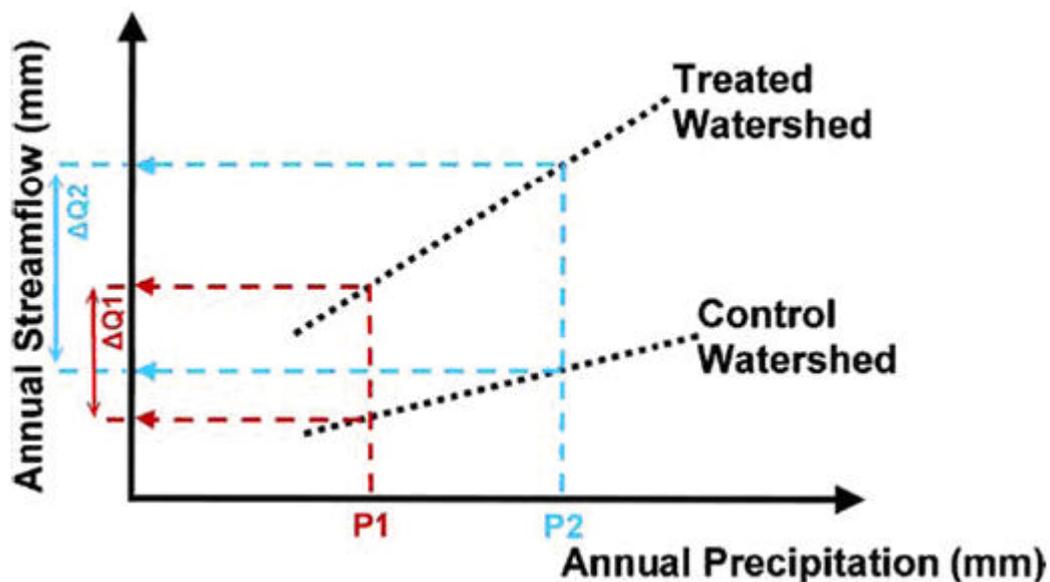


Figura 2.7. Variación de la relación precipitación/escorrentía entre una cuenca tratada y la cuenca de control para la precipitación anual. **Hibbert et al.** (1975).

Las experiencias en *cuencas comparadas* han proporcionado información sobre diferentes tipos de eventos y procesos hidrológicos, que se comentan a continuación:

2.2.2.1. El efecto de las superficies arboladas de la cuenca en las inundaciones.

Desde 1910 uno de los objetivos principales de las experiencias en *Wagon Wheel Gap* era la valoración del impacto de la deforestación en las inundaciones; pero las numerosas investigaciones desarrolladas desde entonces no han aportado novedades significativas. En general la deforestación aumenta los caudales punta y los volúmenes de escorrentía, pero el impacto de las repoblaciones forestales en la cuenca sobre las inundaciones ha resultado poco apreciable, cuando no difícilmente cuantificable.

Entre los numerosos ensayos al respecto se citan los de **Mc Guinness & Harrol** (1971), **Robinson et al.** (1991); **Cosandey** (1993), **Beschta et al.** (2000). Todos ellos llegan a la misma conclusión, que para eventos extraordinarios (causantes de inundaciones) el efecto de las superficies arboladas de cuenca en la laminación de los volúmenes de escorrentía y en los caudales punta de avenida no es apreciable, o resulta del mismo orden de magnitud que la falta de certeza en la medición de la propia descarga. Esta conclusión es la misma a la que se ha llegado en el apartado anterior 2.1, analizando de un modo lógico-matemático la evolución de las inundaciones.

Sin embargo, se señala que los mencionados autores se limitan a comentar los volúmenes de escorrentía y caudales de avenida líquidos, obviando los efectos que el geo-dinamismo torrencial provoca en la cuenca, siempre que tienen lugar en ella las inundaciones. Esto resulta admisible tratándose de ensayos realizados en cuencas experimentales, pero tal simplificación no cabe plantearse en la planificación de una cuenca objeto de gestión.

2.2.2.2. El efecto de las superficies arboladas en los caudales base

Parece ser mucho más directo y patente que en el caso de las inundaciones. Una revisión efectuada por **Jonson** (1998) de las investigaciones realizadas al efecto en los veinte años anteriores por **Hibbert** (1971), **Mc Guinness & Harrol** (1971), **Scout & Lesch** (1997) entre otros, puso de manifiesto que la deforestación de la cuenca aumentaba los caudales base, mientras que las repoblaciones lo disminuían y que los efectos comenzaban a ser perceptibles a partir de que la cuarta parte de la cuenca había sido tratada. Sin embargo, en las experiencias llevadas a cabo por **Ingwesen** (1985) en la cuenca del Bull Run en la franja costera de Oregon, no se mantuvo la regla anterior, sino que el caudal base se redujo tras la tala del bosque. Este efecto fue explicado porque la deforestación impidió que se continuara con el goteo de la lluvia por intercepción de las nieblas que causaba el bosque existente en la cuenca hasta su desaparición. La intercepción de las nieblas por el bosque desempeña un papel muy significativo en el balance hídrico de extensas superficies tropicales, especialmente de montana, como ha puesto de manifiesto **Bruijnzeel** (2004, 2005) en sus múltiples experiencias realizadas en áreas de sueste asiático y América central.

2.2.2.3. El efecto de la recuperación de la cubierta arbolada en la cuenca vertiente tras su deforestación

Bosch & Hewlett (1982) se centraron básicamente en los efectos a medio plazo de la repoblación forestal y a corto plazo de la deforestación, sin prestar mayor atención a las transiciones entre los estados de arbolado y desarbolado. Por el contrario, **Hibbert** (1967) mostró mayor interés en los efectos a medio y largo plazo de la deforestación, utilizando como ejemplo el impacto de la misma en Coweeta. Con este enfoque observó el comportamiento hidrológico de varias cuencas experimentales durante el periodo en el que en las mismas se recuperan sus cubiertas vegetales. Se percató que la única forma de mantener desforestada la cuenca era actuando permanentemente sobre ella, pues de otro modo ésta se volvía a cubrir con la aparición de los sucesivos estadios evolutivos de la vegetación climática. Comprobó que los efectos del tratamiento (deforestación) tenían una duración breve en las cuencas vertientes analizadas, de manera que transcurridos entre 7 y 25 años desde su tratamiento y, dependiendo de las cuencas, su efecto sobre las escorrentías prácticamente se anulaba.

Swift & Swank (1981) y **Swank et al.** (2001) observaron el efecto a medio y largo plazo del regenerado y el posterior crecimiento y evolución del repoblado natural, percatándose que las importantes acumulaciones de escorrentías (volúmenes útiles o cosechas de agua) en la salida de las cuencas vertientes tras la tala de sus superficies arboladas, disminuía progresivamente conforme retornaba la vegetación arbolada a las mismas en las diferentes etapas de la sucesión climática, anulándose en la práctica cuando el bosque se restablecía de nuevo en las cuencas. **Kuczera** (1987) en bosques de *Eucalyptus regans* que cubren las cuencas alimentadoras a la ciudad de Melbourne (Australia), observó que en los 2-3 años siguientes de un incendio, que tuvo lugar en la zona, aumentaron las escorrentía y con ello la acumulación de caudales útiles ó cosechas de agua; pero a continuación se produjo una disminución progresiva de las mismas, que adquirió el valor máximo entre los 15-20 años de haber ocurrido el incendio. Dicha reducción lo atribuyó a la aparición de un nuevo arbolado más joven y con un crecimiento más rápido, que trató de modelizar conforme a la curva que se muestra en la Figura 2.8. También **Watson et al.** (2001) han ilustrado este comportamiento con varios ejemplos en cuencas experimentales cubiertas de *Eucalytus regans*.

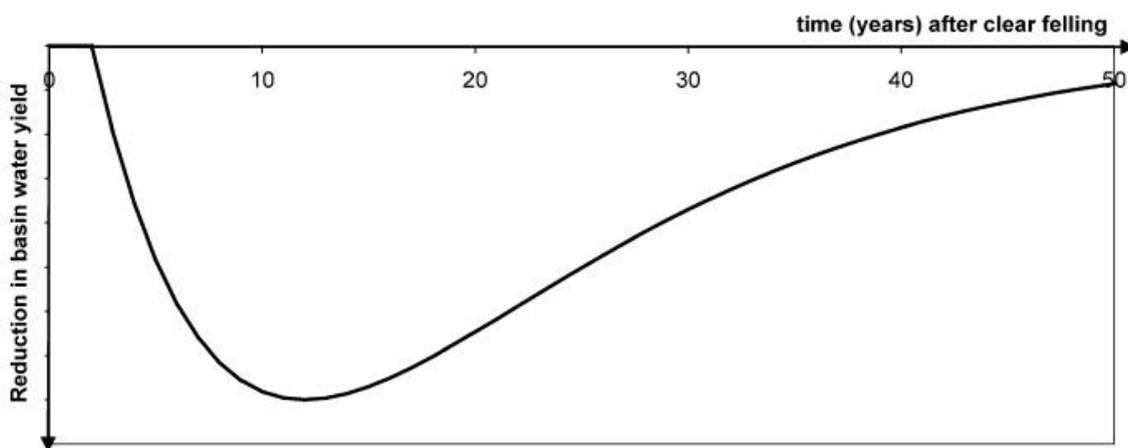


Figura 2.8. Curva propuesta por **Kuczera** (1987) para representar la reducción de las escorrentías (volúmenes útiles o cosechas de agua) debido al crecimiento de la nueva regeneración de eucaliptos tras una deforestación (el aumento de las escorrentías inmediatamente después de la deforestación no está representada en la figura)

Mc Guinness & Harrol (1971) y **Langford & Mc Guinness** (1976) analizaron en Coshocton los efectos prolongados de la repoblación forestal en el equilibrio hidrológico de una cuenca vertiente de carácter agrícola que se había repoblada. Comprobaron que en los primeros años tras la repoblación la reducción de las escorrentías (caudales útiles o cosechas de agua) era muy rápida, pero que ésta se estabilizaba a partir de los 10-15 años. **Andréassian** (2002) utilizando un registro más largo de la misma cuenca, llegó a la conclusión que en ella se mantenía un patrón de comportamiento similar al descrito por **Kuczera** (1987) que se muestra en la Figura 2.8 y que la tendencia definida por los últimos registros obtenidos en las cuencas de Coshocton es que, tratándose de bosque maduros o envejecidos, la reducción de las escorrentías (caudales útiles o cosechas de agua) tiende a estabilizarse en valores muy reducidos; efectos que también parece conseguirse aclarando conveniente la masa arbolada.

Los hidrólogos australianos **Vertessy et al.**, (1995, 1997, 2001) y **Roberts et al.** (2001), examinando los factores fisiológicos que determinan la transpiración de las plantas, intentaron explicar un comportamiento, que parece específico en las masas de eucaliptos, según el cual alcanzan un pico en la transpiración hacia los 15 años de edad, que se corresponde con su estado de máximo crecimiento. Parece lógico pensar que en especies de crecimiento más lento el pico en la transpiración se retrase en unos años.

Tras la exposición del estado de la cuestión en relación con las dos preguntas planteadas al inicio de este apartado 2.2, se realizan algunos comentarios referentes a la repercusión de los bosques en las disponibilidades hídricas de la cuenca vertiente.

1. En relación con la controversia de las relaciones bosque-clima, es evidente que los *naturalistas* no supieron plantear correctamente sus principios o más bien se excedieron con ellos y, por lógica, terminaron aceptando el requerimiento que les impusieron los *ingenieros*: la necesidad de medir, para poder verificar las hipótesis de partida. Pero también es cierto que algunos principios implícitos adoptados por los *naturalistas*, como es la existencia de una *vegetación climática*, no era posible comprobarlo con los procedimientos de medida adoptados en su momento, ni tampoco con el método de las *cuencas comparadas*; porque el significado de su contenido trasciende de lo que se puede medir con éstas. Sin embargo, en la práctica los *ingenieros* han utilizado el principio de la *vegetación climática* en los trabajos de restauración de cuencas vertientes desde sus inicios.
2. La mayor aportación que han prestado a la ciencia los resultados obtenidos a través de las experiencias en *cuencas comparadas*, es que, leídas correctamente con una referencia de al menos 30 años (que tratándose del sector forestal resulta un período más bien corto), responden en todo a la lógica que cabe esperar de ellos. Es lógico que una cuenca deforestada presente un escurrimiento directo superior a la que pueda tener una cuenca arbolada y que, conforme la vegetación va cubriendo a una cuenca que ha sido previamente deforestada, la escorrentía directa en la misma disminuya. Pero también es cierto que los resultados presentados a través de las *cuencas comparadas* muestran una visión parcial de lo que ocurre en una cuenca tras las precipitaciones que tienen lugar en la misma, de las que no se comenta nada sobre su intensidad (da la impresión que no se tienen en cuenta las lluvias torrenciales). Cuando las precipitaciones son torrenciales y especialmente si se trata de eventos torrenciales extraordinarios, los volúmenes de escorrentía y los caudales punta no son la única realidad a considerar en la cuenca; están también todos los efectos causados por el geo-dinamismo torrencial en la misma, que condicionan la situación de ésta con tanta o mayor significación que los caudales líquidos. Los efectos del bosque se hacen sentir tanto en los caudales líquidos como en los sólidos y respecto de éstos pueden ser más contundentes.

No se cuestiona en absoluto el interés de los resultados obtenidos a través de las *cuencas comparadas*, al contrario se los valora muy positivamente, sobre todo a nivel científico. Pero en relación con la ordenación agro-hidrológica de una cuenca vertiente y su posterior proyecto de restauración hidrológico-forestal, si fuera preciso; se trata de establecer sus aportaciones prácticas, así como conocer sus limitaciones. Entre las primeras se mencionan:

- a. Contribuyen a precisar las necesidades de agua en una repoblación forestal (o en un repoblado natural) en su fase de regeneración y en las primeras etapas de crecimiento de la vegetación; sobre todo para las especies que se han utilizado en las experiencias en *cuencas comparadas*.
- b. Continuando con la aportación anterior, pueden mejorar las previsiones del resultado esperado en una repoblación forestal, es decir, sus posibilidades de éxito; lo que resulta interesante tratándose de cuencas ubicadas en climas semiáridos
- c. De lo comentado en los dos epígrafes anteriores, se deduce que es posible realizar una estimación del gasto hídrico adicional que comporta la implantación de una vegetación arbolada respecto de otro tipo de cubierta vegetal, para el periodo comprendido desde que se inicia la repoblación hasta que se asegura la existencia de la masa arbolada (10-20 años, dependiendo de la latitud y altitud del paraje en el que se ejecuta la repoblación).
- d. En algunos parajes y ante situaciones concretas, el gasto hídrico adicional que supone la instalación de una repoblación forestal, puede plantear la conveniencia o no de la instalación y mantenimiento de cubiertas arboladas en la cuenca, cuando los posibles recursos hídricos requeridos para las mismas, resulten determinantes para otros fines o apremie disponer de ellos en forma de escorrentía y su posterior almacenamiento. Conviene señalar que desde una perspectiva teórica la cuestión es muy clara; pero en situaciones reales resulta más compleja y de consecuencias no perceptibles a corto plazo, pues en el bosque todas sus propiedades están muy interconectadas y la consecución del objetivo señalado podría acarrear problemas geo-torrenciales colaterales, que deben ser evaluarlos previamente.

Entre las limitaciones se enumeran:

- a) La mayor parte de las experiencias en cuencas comparadas se refiere a pequeñas cuencas de menos de 2 Km², admitiéndose como norma general que con las grandes cuencas no se puede experimentar y que se trata de cuencas relacionadas con el clásico método hidrométrico, es decir, existe un *efecto de escala* de difícil cuantificación. Realmente las cuencas que tiene sentido ordenarlas y restaurarlas son en general de mediano tamaño, incluso las de los pequeños torrentes objeto de corrección normalmente superan los 100 Km².
- b) La información que aportada la *cuenca de tratamiento (o deforestada)* durante el tiempo que la vegetación se regenera en la misma, es normalmente reducida para la vida prevista (*turno*, en términos forestales) de una repoblación forestal; por lo que sólo se refiere a las necesidades hídricas en los primeros 10-20 años de su existencia, justamente coincidiendo con su fase de mayor crecimiento (el turno de una repoblación o de un regenerado natural en Europa puede oscilar entre los 70-100 años, para especies de crecimiento lento, y entre 25-45 años, para las de crecimiento rápido). Cuando el arbolado alcanza su desarrollo, sus exigencias hídricas se estabilizan dependiendo de su fisiología y de la estación en la que se ubica (definido por su clima y suelo, es decir, por las *condiciones climáticas*).
- c) Lógicamente (atendiendo a lo comentado en el epígrafe anterior *b*), si el arbolado se instala en una estación en la que no tiene cabida por las *condiciones climáticas* de la misma, vegetará mal y terminará por desaparecer de forma natural o quedará con un porte de chaparro.
- d) Los estudios de los fito-climatólogos ponen de manifiesto que la estación debe cumplir con unas condiciones determinadas de clima y suelo para poder acoger el

arbolado o, dicho a la inversa, que cada especie de arbolado tiene unas características culturales que le hacen aptas para determinadas estaciones. Pero esto no quiere decir que la vegetación pueda condicionar el clima.

- e) Las preparaciones del terreno para las repoblaciones forestales se enmarcan en el contexto del apartado anterior *d)* y responden a situaciones en las que, por causa de la degradación del suelo, las características de la estación se encuentran en el límite del *climax* para la vegetación arbolada a implantar. Las preparaciones tienen precisamente por objeto mejorar las condiciones del suelo, en especial su capacidad de retención del agua, para que en los dos años siguientes a la plantación los *brinzales* (las plantas introducidas, de entre uno o dos años en vivero y obtenidas de semilla) puedan superar las condiciones adversas del medio.
- f) Cuando se introducen pastizales en estaciones con capacidad para acoger el arbolado, el agua sobrante se puede transformar en escorrentía, que puede ser almacenada para su aprovechamiento directo; pero este incremento de la escorrentía también puede aumentar la erosión del suelo y el consiguiente transporte de los sedimentos; alterando así paulatinamente el primitivo *climax* y sustituyéndolo por otro estado de equilibrio que supone una menor protección de la cuenca ante eventos torrenciales, especialmente ante los extremos; aunque a largo plazo son los eventos torrenciales ordinarios los que pueden acarrearle el mayor deterioro, cuando sus efectos sobre el suelo son continuados y no se corrigen a su debido tiempo.
- g) Hay que añadir a todo lo dicho, la confusión que se crea en lengua española al hablar de *cosechas de agua*, traducción directa del inglés de *water harverst*, para referirse a incrementos de escorrentía. La cosecha es el resultado de una producción, que sólo es posible en seres vivos, como son las plantas; pero no en el agua que cumple con la ecuación de continuidad y, por tanto, se mantiene constante. La palabra adecuada es *incremento de escorrentía* que se puede aprovechar de una forma inmediata, mientras que el agua del suelo, subsuelo o la de la atmósfera no es posible (en este apartado se ha utilizado también el término *volúmenes útiles*, para significar la oportunidad para su utilización, pero tampoco nos parece muy acertado).

En realidad, la mayoría de los resultados obtenidos a través de las *cuencas comparadas*, eran previsible cualitativamente con anterioridad, pues se disponía de un conocimiento empírico del crecimiento de las plantaciones forestales. Su valor añadido ha consistido en la confirmación de las previsiones y sobre todo en la cuantificación de los resultados.

Por otro lado, los bosques son tan complejos y variados de unas latitudes a otras y, dentro de las mismas latitudes, de una altitud a otra; que es difícil disponer de auténtico modelo de comportamiento de los mismos, salvo que se lleve trabajando un período muy prolongado de tiempo en ellos. La experiencia es fundamental para planificar el futuro de las masas arboladas, por ello es importante la existencia de Servicios Forestales permanentes.

La aplicación de los datos obtenidos en *cuencas comparadas* no tiene ninguna restricción en su entorno más próximo, pero su ámbito se va difuminando conforme se aleja de él. Son datos útiles, pero para asegurar la eficiencia de la ordenación agro-hidrológica de una cuenca vertiente o de su restauración hidrológico-forestal, no basta sólo con ellos, es preciso integrarlos o más bien compaginarlos previamente en algún método hidrométrico de planificación de cuencas hidrográficas. Es necesario no perder

de vista que la planificación es cuestión de cuencas que se gestionan, que son de mayores superficies que las cuencas experimentales.

2.3. SÍNTESIS DE LOS EFECTOS DEL BOSQUE SOBRE LOS RECURSOS AGUA Y SUELO EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA

Tradicionalmente el bosque se ha considerado en su doble vertiente: *a*) como de productor de bienes (especialmente madera y frutos) y *b*) como infraestructura de protección ante los eventos torrenciales. Atendiendo a esta última, en el pasado la capacidad del bosque para frenar los procesos de erosión y degradación del suelo, ha primado sobre sus naturales exigencias hídricas para acometer tales objetivos; además a largo plazo, tras alcanzarse una cubierta estable o pseudo-estable (en la situación óptima se trataría del *climax*), las exigencias hídricas del nuevo sistema se estabilizan con el medio. En la ordenación agro-hidrológica de cuencas y en la restauración hidrológico-forestal de éstas, es necesario considerar estas circunstancias en el momento de adoptar las decisiones, así como asumir los tiempos que impone la naturaleza en el crecimiento de las especies forestales y las necesidades hídricas de éstas en sus diferentes fases de crecimiento y estabilización de la masa arbolada.

2.3.1. La inferencia del bosque en los efectos finales que los eventos torrenciales pueden causar en la cuenca vertiente

En el apartado 2.1 se ha expuesto la incidencia del bosque tanto en la generación de los caudales líquidos y por ende en la laminación de las inundaciones (epígrafe 2.1.1), como su capacidad para controlar la erosión hídrica del suelo y moderar el proceso geotorrencial (que comprende la erosión, el transporte y la sedimentación) en la cuenca vertiente (epígrafe 2.1.2). En ambos casos el efecto del bosque sobre la dinámica del agua y de los sedimentos en la cuenca hidrográfica es mayor tratándose de eventos torrenciales ordinarios, que si se refiere a eventos extraordinarios o extremos, aunque físicamente el comportamiento del bosque se asienta en los mismos principios. Lo que ocurre es que mientras los efectos reguladores y protectores del bosque en la cuenca hidrográfica pueden resultar suficientes, cuando sobre ella inciden de eventos torrenciales ordinarios; pueden ser insuficientes para aguaceros extraordinarios o extremos. Lo que en este apartado se quiere mostrar es que, para el conjunto de la cuenca vertiente, los efectos que se derivan de la incidencia del bosque en el ciclo del agua y los que provienen de la intervención en el ciclo de los sedimentos no se pueden considerar de forma separada sino conjunta. Las manifestaciones de esa actividad simultánea son múltiples y resultan más patentes ante la ocurrencia de eventos torrenciales extraordinarios. A continuación se ilustra con un simple ejemplo hipotético, pero totalmente plausible, una de ella.

Supongamos una cuenca deforestada que es repoblada prácticamente en su totalidad con la pretensión de laminar las inundaciones en su área dominada.

1. Respecto al control de las avenidas, la cuenca en cuestión presentará su situación óptima cuando la repoblación se encuentre en su momento de máximo desarrollo, volviendo a una situación más parecida a la de partida cuando la masa arbolada adulta tenga menores consumos de agua.

2. Pero bajo el punto de vista de emisión de sedimentos, es en la última etapa de bosque adulto y totalmente desarrollado cuando resulta más eficaz; pues reducirá al máximo la descarga de sedimentos, mejorando de este modo la calidad del agua, incluso durante las avenidas.

El ejemplo pone en evidencia que el bosque resulta eficiente en su doble vertiente como regulador de caudales líquidos de avenida, donde para avenidas extremas tiene serias limitaciones; pero sobre todo como regulador de la descarga sólida, en la que su eficacia tiene un mayor campo de acción.

Un texto que contempla ampliamente el doble aspecto que se acaba de señalar es el titulado *Forest, Water and People in the Humid Tropic (Past, present and Future Hydrological Research for Integrated Land and Water Management)* **Bonell & Bruijnzeel** editores (2005); especialmente en su capítulo final *Forest, Water and People in the Humid Tropics: an emerging view (Los bosques, el agua y las personas en los trópicos húmedos: una visión emergente, Bruijnzeel; Bonell; Gilmour y Lamb, (2005) pp. 906-924*, en el que sus autores comparan para los bosques tropicales las afirmaciones comunes con las evidencias científicas y las enseñanzas que se han conseguido con las investigaciones. La Tabla 2.8 recoge una síntesis de la aportación realizada por los citados investigadores. Aunque el artículo esté específicamente centrado en los bosques húmedos de los trópicos, las conclusiones que aparecen en la Tabla 2.8 son generalizables a cualquier tipo de masas arboladas, desde las del propio artículo hasta las de los climas húmedos y templado fríos; incluidos también los bosques de climas mediterráneos. La única consideración importante que se puede añadir es que: mientras en los trópicos treinta años puede ser suficiente para que se establezca la masa arbolada y lo mismo puede ocurrir con las especies de crecimiento rápido (especies de determinados géneros como los *Pinus* y *Eucaliptus*) en las zonas templado húmedas de Europa o Latinoamérica; en otros climas (como en los templado fríos, los continentales o los mediterráneos, por poner varios ejemplos), este periodo se prolonga entre el doble y el triple de lo que se necesita en las zonas tropicales, dependiendo de las especies y de la estación. Hay especies forestales con turnos de ochenta años y también los hay con cien e incluso más años.

AFIRMACIONES COMUNES	EVIDENCIA CIENTÍFICA	ENSEÑANZAS
- El bosque incrementa las precipitaciones y su aclareo implica una reducción e irregularidad de las mismas.	- El aclareo del bosque es improbable que reduzca significativamente la precipitación total, pero podría reducir las precipitaciones al comienzo y cerca del final de la estación lluviosa. - Las aportaciones adicionales por medio de las precipitaciones ocultas (nieblas) recibidas en los bosques nubosos de montaña se pierden si hay aclareo total.	- El aclareo del bosque debe afectar a áreas muy grandes ($\gg 10.000 \text{ Km}^2$) para que produzca efectos. Se ha comprobado un efecto $< 10\%$ en el caso de la cuenca del Amazonas en clima continental y en menor medida bajo condiciones climáticas marítimo tropicales.
- El bosque actúa como una esponja absorbiendo el agua durante la estación lluviosa y cediéndola durante la estación seca. La tala de bosques agota las reservas de agua, particularmente durante la estación seca, debido a la pérdida del efecto <i>esponja</i> .	- La tala del bosque incrementa la escorrentía total, en especial durante los períodos de caudal bajo. - El caudal de la estación seca se reduce más si la capacidad de almacenar agua del suelo está seriamente afectada (como en los casos de cuencas muy degradadas o urbanizadas). - El aclareo de los bosques nubosos puede llegar a reducir los caudales de la estación seca y posiblemente la escorrentía total.	- El incremento total y estacional de las escorrentías, en áreas destinadas a pastos o a cultivos, sólo se manifiesta si la capacidad de infiltración se mantiene. Los suelos de textura fina son los más vulnerables a la degradación.
- La tala de los bosques causa inundaciones debido a la pérdida del efecto <i>esponja</i> .	- La tala de bosques afecta al volumen de escorrentía de los aguaceros de pequeña y mediana intensidad a escala local ($< 10 \text{ Km}^2$); pero la magnitud de su impacto es escasa cuando se trata de eventos extremos (inundaciones) para cualquier escala. - También una densa red de carreteras incrementa los picos máximos de caudal. - El caudal de la estación húmeda para grandes cuencas, sin considerar los aguaceros, probablemente se incrementa debido al efecto acumulativo de pequeñas infiltraciones continuadas.	- El uso del suelo tras la tala del bosque debe contar con una buena cubierta de vegetación superficial y un buen trazado de caminos. En caso contrario, los caudales generados por aguaceros intensos e incluso moderados, superiores a la media, se incrementarán (como sucede en las cuencas muy degradadas).
- La tala de los bosques incrementa la erosión, los corrimientos o deslizamientos de tierras y la sedimentación en los arroyos.	- Una buena cubierta vegetal de cualquier tipo limita o elimina la erosión superficial. - Una buena cubierta de bosque reduce los corrimientos o deslizamientos superficiales, pero no así los profundos y locales, que son originados por las precipitaciones en combinación con la geología y la topografía.	- La protección del suelo es mayor por el rebrote de la vegetación y las hojas en descomposición del suelo, que por la copa de los árboles. Por ello, el pastoreo, los incendios y la acumulación de desperdicios se deben evitar a toda costa.

Tabla 2.8. Afirmaciones comunes, evidencias científicas y enseñanzas acerca de las consecuencias hidrológicas de la reforestación (**Brujinzeel; Bonell; Gilmour y Lamb, 2005**).

(Continuación Tabla 2.8)

- La reforestación incrementa las precipitaciones.	- No hay evidencia de que esto ocurra.	- La reforestación de extensas superficies (>10.000 Km ²) pudiera influir, pero todavía está por demostrar experimentalmente. - La plantación de árboles (incluso en setos) en cinturones para interceptar las nubes de gradiente en ciertas montañas, incrementa la precipitación neta que llega al suelo, debido a la captura de precipitación <i>oculta</i> (niebla, lluvias conducidas por el viento, etc.).
- La reforestación devuelve el flujo a los ríos (particularmente en la estación seca).	- A corto plazo (30 años) la reforestación disminuye la escorrentía y el caudal base.	- Como el consumo del agua disminuye en los bosques maduros (>30 años), la escorrentía se puede incrementar.(*) ¹
- La reforestación previene las inundaciones.	- No se conoce el efecto para cuencas muy degradadas. - La reforestación reduce los efectos de los aguaceros de pequeña y moderada intensidad, pero no evita los fenómenos extremos.	- Cuanto más profundo sea el suelo, el efecto del bosque en la reducción del flujo causado por un aguacero será más eficiente.
- Las especies usadas en la reforestación son todas similares en cuanto a sus efectos (positivos) hidrológicos.	- Las especies de rápido crecimiento tienden a usar más agua que las de crecimiento lento. Los efectos hidrológicos varían con la proporción de área reforestada y con la densidad de la plantación.	- Los eucaliptos, las acacias y algunos pinos son árboles de rápido crecimiento y grandes consumidores de agua. - El alto consumo de agua a veces se incrementa por la transferencia de calor desde el monte bajo próximo.
- La reforestación controla y elimina rápidamente toda la erosión.	- No se eliminan la erosión en los barrancos, ni los corrimientos o deslizamientos de tierras de tipo rotacional. - La erosión bajo bosque de hoja caduca ancha (teca) en suelos muy arcillosos es normalmente desenfrenada.	- Se necesitan medidas mecánicas adicionales. - El rebrote y los desperdicios del bosque deben ser usados para provocar un efecto positivo.

(*)¹ Esto es válido para bosques tropicales, en climas continentales o templado-fríos el bosque maduro puede requerir periodos de 80 o más años

Tabla 2.8. (Continuación) Afirmaciones comunes, evidencias científicas y enseñanzas acerca de las consecuencias hidrológicas de la reforestación (**Brujinzeel; Bonell; Gilmour y Lamb, 2005**).

2.3.2. La inferencia del bosque en los recursos hídricos de la cuenca vertiente

Ni en la segunda mitad del siglo XIX en Europa, cuando se inicia la restauración de sus cuencas hidrográficas de montaña; ni en la primera mitad del siglo XX en Estados Unidos, en los tiempos de la promulgación de la Ley de Conservación de Suelos (1935), se plantea considerar la incidencia de las masas arboladas en el balance hídrico de las cuencas hidrográficas. En ambas situaciones el problema se centra en controlar los diferentes tipos de erosión del suelo, para evitar situaciones catastróficas y asegurar la productividad de las tierras. Si ello obligaba a mantener cubiertas vegetales permanentes en diferentes zonas de la cuenca, especialmente en sus cabeceras y en las laderas de mayores pendientes, donde los procesos erosivos se manifestaban con mayor intensidad, esta necesidad se asumía dentro del plan general de ordenación de la cuenca. Más aún, en los primeros años del **Soil Conservation Service** se habla específicamente de conservación de suelos agrícolas.

Por otra parte, se debe señalar que los restauradores de cuencas vertientes se toparon en ocasiones con problemas relacionados con la falta de humedad edáfica en sus trabajos, lo que les obligó a mejorar las técnicas de preparación del suelo para las repoblaciones forestales, para lograr superar precisamente estos problemas; pero la cuestión del consumo de agua por los árboles (salvo posibles excepciones) no se planteaba. Tampoco los organismos de cuenca, básicamente regidos por ingenieros civiles, mostraban un empeño especial por incidir en la cuestión; pues operaban con cuencas de gran superficie, en las que existían todo tipo de cubiertas de vegetación, de modo que para la evaluación global de las reservas o aportaciones hídricas disponibles en la cuenca, los únicos factores determinantes en la práctica resultaban ser la propia superficie de la cuenca y su clima. Sin embargo, si mostraban preocupación por los problemas relacionados con la erosión del suelo, porque afectaba a la vida útil de los embalses y a la propia calidad de las aguas embalsadas.

En el panorama de la investigación actual diversos autores **Calder** (1997, 1998, 1999, 2002), **Bruijnzeel** (1989, 1994, 2004, 2005), **Huber & Iroume** (2001), **Iroume & Huber** (2002) entre otros, han realizado balances hídricos en áreas arboladas y evaluado la evapotranspiración real de las mismas. El aspecto más importante de los resultados obtenidos en sus investigaciones, es la tendencia observada que la transformación de extensas superficies de desarboladas a arboladas o viceversa en una cuenca vertiente, modifica el estado de las disponibilidades de agua en las diferentes áreas de ésta. Este aspecto tiene especial interés en la ordenación agro-hidrológica de una cuenca vertiente, porque condiciona el aprovechamiento posible del recurso agua por sus pobladores. A modo de ejemplo, se muestra la siguiente situación: Cuando la repoblación en las cabeceras de las cuencas alcanza superficies importantes, en los años siguientes en los que el repoblado se encuentra en su estado de máximo crecimiento, es previsible que se produzca una alteración del ciclo del agua en la cuenca y, en consecuencia, se pueda experimentar una disminución en las disponibilidades de agua en las áreas dominadas, hasta que el ciclo del agua en la cuenca se estabilice de nuevo cuando el arbolado se haya consolidado en las áreas dominantes. Pero en otros casos, como en el de un bosque tropical de nieblas que ocupe las áreas dominantes de una cuenca vertiente, su tala podría acarrear también problemas por reducción de agua en las áreas dominadas, al desaparecer el suministro de agua que facilitaba el bosque de cabecera, por la condensación de las nieblas en su vuelo. Cada situación concreta es necesario analizarlo atendiendo a sus características, admitiendo que cada tipo de bosque tiene un consumo de agua por evapotranspiración, pero considerando también las ventajas que su presencia comporta.

Aunque la debida consideración de la importancia del consumo de agua por las masas arboladas sea una cuestión que se ha puesto de actualidad en las últimas décadas, en realidad, implícitamente las exigencias hídricas de la vegetación siempre se han considerado, tanto en la agricultura tradicional (necesidades de agua para los cultivos y su adición con riegos hasta lograr cubrirlas), como en la selvicultura tradicional, en la que la *elección de especie* se supedita a su capacidad para atemperarse al medido donde se implanta (se eligen especies climáticas o pseudos-climáticas de estadios anteriores en la sucesión al climax), reforzándose con las convenientes preparaciones del terreno previas a los trabajos de plantación, a fin de mejorar las condiciones del suelo para retener el agua de las precipitaciones, para que en los dos años siguientes a la plantación los *brinzales* (plantas introducidas con la repoblación) puedan superar las condiciones adversas del medio. Las preparaciones de suelo anteriores a la plantación se extreman sobre todo en repoblaciones en zonas semiáridas.

En el ámbito de los cultivos agrícolas existen ecuaciones matemáticas, fundamentadas bien en la energía calorífica que recibe la tierra, o en el poder evaporante de la atmósfera, e incluso en ambos, para estimar las necesidades de agua en los cultivos; al menos desde que **Thornthwaite** (1939) publicara sus primeros trabajos. La mayoría de dichas ecuaciones son sencillas y expresadas en función de parámetros climáticos y la comprobación de las mismas se ha realizado mediante lisímetros.

En el ámbito forestal, dado que las repoblaciones forestales no se riegan, los criterios para asegurarse que los *brinzales* satisfagan sus necesidades de agua en el monte, se han orientado en la búsqueda de las condiciones de equilibrio clima-vegetación en función de parámetros fito-climáticos; apoyándose las comprobaciones en el comportamiento vegetativo de los propios *brinzales* (cuanto mejores sean las condiciones del medio, definidas con parámetros fito-climáticos, para acoger a los *brinzales*; mejor será el desarrollo de los *brinzales*, que se podrá estimar en función de su propio crecimiento en el monte).

Esta dicotomía, consecuencia de las diferentes labores culturales que se practican en la agricultura y en la selvicultura, ha condicionado su diferente desarrollo en los modelos para estimar las necesidades hídricas en cada una de ellas; pero ambas presentan un punto de coincidencia que es la que se pretende mostrar a continuación.

En el campo de la agricultura cabe recordar los trabajos de **Thornthwaite** (1939-48), especialmente la definición por el autor del concepto de *evapotranspiración potencial* (1944) y la aportación de una ecuación para su deducción (1948). También **Penman** (1948) establece su primera ecuación (que es el punto de partida de otras posteriores) para el cálculo de la evapotranspiración en una estación, siguiendo una línea conceptual similar pero con un desarrollo más detallado; con ella las necesidades hídricas de la vegetación resultan ligeramente superiores que utilizando la ecuación de **Thornthwaite**. La ecuación propuesta por **Blaney & Criddle** (1950), por ejemplo, para establecer las necesidades de agua en los cultivos, aporta unos valores mayores que utilizando la ecuación de **Thornthwaite** y menores que con la de **Penman**.

Un paso realmente importante tiene lugar cuando se analizan las disponibilidades hídricas de una estación a través de balances entre el agua incorporada a la estación (precipitaciones) y el agua extraída de la misma (evapotranspiración). Apoyándose en este esquema de *balance hídrico* **Thornthwaite & Mather** (1955) definen el concepto y significado de la *evapotranspiración real* y establecen un procedimiento para su cálculo. También **Turc** (1961)

determinó su propia ecuación para estimar la evapotranspiración potencial y las necesidades de agua para el riego.

Se recuerda que las ecuaciones de la evapotranspiración mencionadas, se formularon para ser calculadas a partir de parámetros climáticos o de física de la atmósfera (temperatura, insolación, tensión de vapor, etc.) y que su comprobación se realizó mediante lisímetros, realizándose las experiencias en diferentes partes del mundo. **Turc**, por ejemplo, experimentó en regiones de Francia, Escocia y África del norte. Además, tanto **Thornthwaite** como **Turc** y **Penman** utilizaron las ecuaciones obtenidas en sus investigaciones para *plantear diferentes aproximaciones climáticas*. En este sentido, tienen un punto de convergencia con las formulaciones realizadas por los fito-climatólogos, aunque en sus planteamientos iniciales las diferencias resulten significativas.

Los fito-climatólogos (cuyos trabajos son coetáneos con los autores anteriores) tratan de definir los climas del planeta y su relación con la vegetación que los caracteriza (*vegetación climática*), apoyándose principalmente en las variables de temperatura y precipitación mensuales y en otros parámetros relacionados con ellas, como los días de helada, periodo de sequía, etc. y la comprobación de los resultados lo plantean atendiendo al desarrollo de la vegetación en la propia estación en la que se han obtenido (por ejemplo, crecimiento de las plantas en $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$), pero sobre todo en el tipo de la vegetación existente.

Los estudios fito-climáticos han sido muy utilizados entre los ingenieros de montes españoles para delimitar las posibles áreas de repoblación, además en ocasiones han contribuido a su desarrollo e implementación. En general resultan adecuados en los países semiáridos o con problemas derivados de déficit hídricos, para utilizarlos como indicadores de la posibilidad de introducir una vegetación arbolada en una determinada estación o incluso en una determinada comarca.

Entre los primeros fito-climatólogos se cita a **Gausson** (1955) que establece una clasificación climática basada en lo que denominó *curvas ombrotérmicas*. Sus trabajos permitieron a **Walter & Lieth** (1960) definir sus *Climodiagramas*. A su vez, las investigaciones de estos últimos permitieron a **Allúe** (1966) abordar el estudio del fito-clima de la España peninsular, basándose en el criterio de las *subregiones fitoclimáticas*. La continuación de sus investigaciones permitió a **Allúe** (1990) aportar una versión ampliada y mejorada de sus resultados anteriores.

En la misma línea se encuentra el *índice bioclimático* de **Vernet** (1966) y paralelamente surgieron los índices bio-climáticos orientados a estimar la potencialidad de la producción forestal o del crecimiento de la biomasa, como se prefiere denominarlo en el presente. Estos índices no difieren sustancialmente de los índices fito-climáticos y entre ellos se pueden incluir los de **Paterson** (1956), **Montero de Burgos & González Rebollar** (1974) y **Gandullo & R. Serrada** (1976).

Estos últimos índices se definieron para masas arboladas, aunque no específicamente para determinar sus balances hídricos, sino para demarcar con la mayor fiabilidad posible las áreas aptas para acoger la vegetación arbolada en los trabajos de repoblación, o en términos más concretos, para definir las estaciones forestales (**Nicolás & Gandullo**, 1964; **Gandullo & Sánchez-Palomares**, 1994).

Atendiendo a todo lo expuesto, se deduce que: si en el pasado no si hubo una preocupación por el consumo de agua de las masas arboladas, si lo hubo para las necesidades de agua de los brinzales que iban a generar dichas masas arboladas; que se materializó fundamentalmente en dos aspectos: la *elección de especie* y las *preparaciones del terreno* para acoger a los *brinzales* en los dos primeros años tras la plantación. Para ambos aspectos la preparación edafológica de los ingenieros repobladores resultó fundamental, porque desempeñó el papel de precisar las condiciones climáticas de la estación (monte) a repoblar.

Centrándose en la elección de especie, los criterios utilizados han tenido una fuerte componente empírica y son los siguientes: *a)* el conocimiento del *temperamento de las especies* (es decir, su capacidad para adaptarse al medio) y *b)* los *índices fito-climáticos*, que prevén el crecimiento de las especies en el medio en el que se implantan en función de la temperatura y precipitación media en dicho medio; pero que en realidad se adoptan pensando más en asegurar que la repoblación que en la propia producción forestal.

En la *elección de especie* para una repoblación forestal es muy importante conocer su destino final de la repoblación y la capacidad del medio para acogerla. Sintetizando se pueden presentar los dos casos siguientes:

1. Cuando se trata de repoblaciones altamente productivas, como algunas plantaciones de pinos o eucaliptos en Chile, donde las condiciones del medio para acoger a la plantación son muy favorables e incluso óptimas, las características fisiológicas de la planta a introducir son un factor determinante en la *elección de especie*, porque permite asegurar la producción esperada con la plantación. En algunos casos estas repoblaciones se llegan incluso a abonar y el ciclo productivo es relativamente corto (si se utiliza el término forestal clásico, se hablaría que el turno de corta está entre 15-30 años). Estas plantaciones presentan similitudes con los cultivos agrícolas y por tanto la corta final, normalmente a hecho (matarrasa), se identifica con la cosecha y se le denomina de este modo. En este tipo de plantaciones tiene pleno sentido contemplar el balance hídrico de las mismas, para asegurar el rendimiento sustentable de las propias plantaciones.
2. Pero si se refiere a repoblaciones con fines protectores (que tratan de controlar la erosión del suelo en la propia superficie que se repuebla y la defensa ante el geo-dinamismo torrencial de las áreas dominadas de la cuenca vertiente, ante la aparición de eventos torrenciales extraordinarios), la *elección de especie* no se limita a conocer las características fisiológicas de la planta y asegurarse su perfecto estado sanitario, sino que hay también otros aspectos a considerar tales como: la capacidad de la especie para atemperarse al medio en el que se instala (auto-ecología), y la posibilidad de mejorar éste para los primeros años de la repoblación, lo que exige un buen conocimiento edafológico del área a repoblar y del comportamiento hidrológico de las técnicas de preparación del terreno para la repoblación.

Cuando se precisan todos estos requisitos, sobre todo en áreas semiáridas y muchas veces sobre suelos degradados, es porque las disponibilidades hídricas del área en cuestión están en el límite de acoger la repoblación. Si la repoblación prospera, lógicamente la masa arbolada transpira y necesita de recursos hídricos para subsistir, pero al mismo tiempo sus sistemas radicales van generando un suelo forestal donde anteriormente existía un suelo degradado o a lo sumo un suelo pobre cubierto de matorral y este suelo forestal permite un mejor aprovechamiento del agua procedente de las precipitaciones.

Masas arboladas con estas características existen, su producción forestal es muy baja y su turno se eleva entre 60-90 años, pero su objetivo principal no es producir madera. Se debería investigar cómo evoluciona su comportamiento ante el ciclo del agua, pero a través de un programa de seguimiento a largo plazo.

Por último, se adjunta un resumen de las investigaciones realizada en el cuatrienio 1990-94, por un equipo formado por profesores de los Departamentos de Selvicultura e Ingeniería Forestal de la Universidad Politécnica de Madrid, para *evaluar el comportamiento hidrológico de las diferentes labores de preparación del suelo para las repoblaciones forestales*, financiado por la CYCIT y el ICONA y dirigido por **Serrada & Mintegui**. Los resultados de los experimentos relacionados con las investigaciones señaladas se sintetizan en la Tabla 2.9 y el contenido de ésta se explica a continuación.

Las experiencias se llevaron a cabo en dos laderas forestales, la primera situada en Puebla de Valles (Guadalajara) municipio situado a unos 160 Km. de Madrid y la segunda en los montes vertientes a la ciudad de Málaga, al sur del país. Se establecieron 19 parcelas de 80 m² cada una de ellas, además de la parcela testigo (que en ambos laderas estaba constituido por matorral). Sobre ellas se aplicó artificialmente una lluvia hasta que, en el caso de la parcela testigo se empapara totalmente el suelo e iniciara la escorrentía superficial; en las restantes parcelas se operó de igual modo pero la lluvia se interrumpía cuando: o bien aparecía la escorrentía incipiente sobre el terreno (en los casos de roza o decapado del matorral), o bien cuando se rompía la estructura hidráulica que suponía de preparación del suelo en la parcela o en su defecto ésta quedaba totalmente anegada.

La notación: $c=P_i/P_t$ que aparece en las columnas del 3 al 6 de la Tabla 2.9 representa el cociente entre la precipitación de ensayo incidente sobre cada una de las diferentes parcelas en las que se había realizado alguna preparación del suelo previa a la plantación P_i y la precipitación de ensayo incidente sobre la parcela testigo P_t .

Con los NC (Números de Curva) que aparecen en las columnas del 7 al 10 de la Tabla 2.9 se operó de forma similar; la notación NC_i/NC_t representa el cociente entre el NC_i correspondiente a cada una de las diferentes parcelas en las que se realizó alguna preparación del suelo previa a la plantación y el NC_t que corresponde a la parcela testigo.

Conviene aclarar que lo habitual en la preparación del suelo para las repoblaciones forestales es realizar dos tipos de operaciones, ambas aparecen en la Tabla 2.9. Por un lado, están las que despejan el terreno de la vegetación existente en el emplazamiento donde se introducen las nuevas plantas; entre ellas se incluyen la roza (que puede ser en puntos, en fajas o total) y los decapados (que pueden ser por fajas o total). Por otro, están todas las restantes operaciones referidas en la Tabla 2.9, que preparan el terreno propiamente dicho, para facilitar que éste absorba la mayor parte del agua de las precipitaciones, a fin de poner a disposición de la nueva plantación. Es lógico que en las cinco primeras operaciones las relaciones $c=P_i/P_t$ resulten inferiores a la unidad, porque las mismas empeoran las condiciones de absorción del agua en el suelo; mientras que en los restantes casos ocurra lo contrario porque las mejoran, en ocasiones hasta niveles de duplicarlo. Por supuesto, siempre resultan situaciones anómalas en relación con este coeficiente c (como el ahoyado manual mecanizado en Puebla de Valles y el subsolado cruzado y la roza en fajas con subsolado en los montes de Málaga) pero éstas entran dentro de lo esperable en los ensayos.

Tipo de preparación del suelo		Parcelas de Puebla de Valles		Parcelas de los montes de Málaga		Parcelas de Puebla de Valles		Parcelas de los montes de Málaga	
Labor	Símbolo	Intervalo de variación de $c=P_i/P_t$	Valor medio de $c=P_i/P_t$	Intervalo de variación de $c=P_i/P_t$	Valor medio de $c=P_i/P_t$	Intervalo de variación NC_i/NC_t	Valor medio del NC_i/NC_t	Intervalo de variación NC_i/NC_t	Valor medio del NC_i/NC_t
Roza en puntos	RP	0,38-0,93	0,66	0,58-0,94	0,76	1,02-1,47	1,20	1,02-1,22	1,12
Roza en fajas	RF	0,74-1,06	0,90	0,77-0,97	0,87	0,97-1,08	1,03	1,01-1,11	1,05
Roza total	RT	0,73-0,78	0,76	0,56-0,75	0,66	1,09-1,13	1,10	1,12-1,24	1,16
Decapado en fajas	DF	0,33-0,72	0,53			1,17-1,27	1,23		
Decapado total	DT	0,19-0,73	0,46	0,41-0,61	0,51	1,37-1,72	1,50	1,16-1,34	1,26
Ahoyado manual	AM	0,74-1,89	1,32	1,07-1,51	1,29	0,75-1,08	0,92	0,85-0,97	0,90
Ahoyado manual mecanizado	AAM	0,72-1,14	0,93	0,86-1,17	1,02	0,95-1,17	1,03	0,94-1,06	1,02
Ahoyado con retroexcavadora	AR			1,64-2,70	2,17			0,60-0,78	0,67
Ahoyado con ripper	ARP			1,26-1,48	1,37			0,86-0,95	0,90
Subsolado lineal de 40 cm.	SL4	1,25-2,44	1,85			0,65-0,89	0,81		
Subsolado lineal de 60 cm.	SL6	1,32-2,00	1,66	2,27-3,28	2,78	0,66-0,90	0,81		
Subsolado cruzado en rombo	SC	0,94-1,90	1,42	0,87-1,09	0,98	0,75-1,03	0,88	0,96-1,06	1,00
Subsolado lineal	SL					0,78-0,89	0,84	0,56-0,65	0,60
Subsolado en máxima pendiente	SMP			2,10-2,65	2,38			0,59-0,68	0,64
Acaballonado con desfonde	ADF	1,41-2,46	1,94			0,58-0,88	0,70		
Acaballonado superficial	AS	0,71-1,44	1,08	1,39-1,68	1,54	0,82-1,12	0,99	0,78-0,85	0,83
Acaballonado con Tramet	AT	1,41-3,00	2,21			0,49-0,88	0,69		
Labor con Tramet completa	LT	1,25-1,85	1,55			0,78-0,89	0,84		
Aterrazado de 2m. con subsolado	AH2	0,87-3,47	2,17	2,74-3,41	3,08	0,44-1,04	0,70	0,54-0,57	0,55
Roza en fajas con subsolado	TTAE			0,60-1,22	0,91	0,61	0,61	0,93-1,21	1,05

Tabla 2.9. Trabajos de preparación del suelo para las repoblaciones forestales. Las operaciones en Puebla de Valles (Guadalajara) se realizaron en tres ocasiones, abril 1992; junio 1992 y octubre 1992 y las operaciones en los montes que vierten a la ciudad de Málaga se efectuaron también en tres ocasiones, octubre 1994; noviembre 1994 y diciembre 1994.

Tratándose del cociente NC_i/NC_t ocurre al contrario que con el coeficiente c ; en este caso cuando $NC_i/NC_t < 1,0$ se interpreta s que existe un incremento la capacidad de absorción de agua por el suelo (lo que ocurre con casi todas las operaciones de la Tabla 2.9 menos con las relacionadas con la roza y el decapado; presentándose anomalías en el ahoyado manual mecanizado tanto en Puebla de Valles como en los montes de Málaga y además en estos últimos aparecen discrepancias con el subsolado cruzado y con la roza en fajas con subsolado)

En cualquier caso, la preparación final del terreno, incluidos ambos tipos de operaciones, resulta favorable para acoger a la planta en los dos primeros años de su existencia, salvo situaciones de sequías críticas y prolongadas.

3. ESQUEMA DE LA ORDENACIÓN AGRO-HIDROLÓGICA Y DE LA RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-FORESTAL PARA UNA CUENCA VERTIENTE EN EL PROYECTO EPIC FORCE

3.1. OBJETIVOS DE LA ORDENACIÓN AGRO-HIDROLÓGICA Y DE LA RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-FORESTAL DE UNA CUENCA VERTIENTE

Los dos objetivos fundamentales de la ordenación agro-hidrológica de una cuenca vertiente, así como de su posterior restauración hidrológico-forestal en el caso de que lo necesite, que se asumen en el Proyecto EPIC FORCE, son:

1. La protección de la cuenca vertiente, para amortiguar los efectos geo-torrenciales que le puedan causar las precipitaciones torrenciales, tanto ordinarias como extraordinarias, o las repentinas fusiones del manto de nieve que sucedan en la misma.
2. El mejor aprovechamiento de los recursos agua y suelo en la cuenca hidrográfica, es decir, su aprovechamiento sustentable.

Para ambos objetivos se actúa tanto en el ámbito de las superficies vertientes, como en los cauces de evacuación.

- a) En las primeras, planificando los usos más adecuados del suelo para sus diferentes zonas, con el propósito de influir en los ciclos del agua y de los sedimentos, a fin de tratar de moderar sus procesos y en el caso de situaciones extremas incluso de regularlos, lo que implica aplicar las acciones pertinentes para una distribución estratégica de las cubiertas vegetales permanentes (en especial el arbolado) en la cuenca vertiente, así como la adopción de las medidas convenientes para el control de las escorrentías superficiales y la conservación de los suelos.
- b) En los segundos, analizando el comportamiento de los cauces ante las diferentes avenidas, ordinarias o extraordinarias, que pasen por ellos; para regular el tránsito de las corrientes e incluso, tratándose de avenidas extraordinarias, laminarlas; complementando dichas acciones mediante técnicas de bioingeniería o ingeniería paisajística.

En cualquier caso, el previsible comportamiento de la cuenca hidrográfica se debe analizar a largo plazo y para las dos situaciones que en la misma se presentan:

1. Cuando le inciden precipitaciones torrenciales, en especial cuando se trata de eventos extraordinarios.
2. Durante los periodos que transcurren entre precipitaciones torrenciales.

La *ordenación agro-hidrológica* se centra en el estudio del estado físico de la cuenca vertiente y en el análisis de su previsible comportamiento ante los eventos torrenciales, tanto ordinarios como extraordinarios, con el propósito de conocer como es realmente la cuenca y cómo se comporta; así como para prever su evolución y detectar sus carencias, a fin de proponer las medidas pertinentes para tratar de subsanarlas.

La *restauración hidrológico-forestal* implica llevar a cabo en la cuenca vertiente las medidas adoptadas en la *ordenación agro-hidrológica*, para protegerla de los efectos

que el geo-dinamismo torrencial provocado por los eventos torrenciales le pueda causar, así como para asegurar su buen funcionamiento hidrológico y la correcta conservación de sus suelos en los periodos que transcurren entre eventos torrenciales.

3.2. RESUMEN DEL ESTADO DE LA CUESTIÓN EN RELACIÓN CON LA ORDENACIÓN AGRO-HIDROLÓGICA DE LA CUENCA VERTIENTE

Para conocer el estado físico de la cuenca vertiente y su comportamiento ante los eventos torrenciales, es preciso atender: *a)* los factores físicos que la definen y que intervienen en los procesos que en la misma se producen; *b)* los principios físicos que explican dichos procesos y *c)* las técnicas de evaluación (medición o estimación) de los efectos que causan los procesos físicos.

Pero no se debe olvidar que los eventos torrenciales son aleatorios y que algunas de las técnicas de restauración, empleadas en la cuenca vertiente, requieren de un periodo de tiempo para que funcionamiento responda a lo proyectado (por ejemplo, en el caso de las repoblaciones forestales); por tanto, la corrección de la cuenca es un proceso dinámico y exige de sucesivas aproximaciones, debiéndose atender en todas ellas a la respuesta que transmita la cuenca de las anteriores actuaciones efectuadas en ella.

Centrándose específicamente en el *conocimiento del estado físico de la cuenca*, los factores que la definen y que incluso permiten estudiar su comportamiento ante el ciclo del agua y ante los procesos geo-torrenciales que se desencadenan en ella (erosión, transporte y sedimentación) por causa de las precipitaciones torrenciales o de fusión repentina del manto de nieve, se centran en los cuatro grupos siguientes:

- a) *Características morfológicas y de pendientes de la cuenca vertiente y/o de las subcuencas* en las que ésta se divide para precisar su estudio hidrológico, que en su conjunto constituyen el territorio objeto de análisis. También se consideran las características de los cauces alimentados por dichas cuencas, que representan el drenaje superficial de las mismas.
- b) *Características de los suelos en la cuenca vertiente*, considerando el suelo en su triple función: *a)* como acumulador o escurridor de las disponibilidades hídricas que recibe; *b)* en su relación con su susceptibilidad al fenómeno de la erosión hídrica y *c)* en su aspecto edafológico, como elemento capaz de mantener diferentes tipos de cubierta vegetal en la cuenca.
- c) *La vegetación*, entendida como uso del suelo, reguladora del proceso del ciclo del agua y de los procesos geo-torrenciales.
- d) *El clima*, fundamentalmente las precipitaciones, que representan el factor desencadenante de todo el ciclo del agua y de los procesos del geo-dinamismo torrencial; pero también el binomio temperatura-precipitación en las diferentes estaciones del año, por su condición determinante en la germinación y crecimiento de la vegetación, e incluso en la distribución de las diferentes especies vegetales (especialmente tratándose de las arboladas) en las distintas regiones del mundo.

Además de estos factores, para analizar el *comportamiento previsible de la cuenca vertiente*, tanto en los momentos de eventos torrenciales (ordinarios y extraordinarios) como durante los periodos que transcurren entre dos eventos torrenciales consecutivos, se precisa tener en cuenta los siguientes aspectos:

- 1) Presencia o no del evento torrencial en la cuenca vertiente.
- 2) Análisis temporal del fenómeno.
- 3) Estado físico del agua en los procesos (torrenciales o no torrenciales) que tienen lugar en la cuenca vertiente (ejemplos, en las precipitaciones el agua se encuentra en estado líquido, pero en la evapotranspiración actúa como vapor y en ambos casos interviene la cuenca vertiente, bien como receptora o bien como emisora).
- 4) Fenómenos que provocan los eventos torrenciales o que se producen durante su ausencia en la cuenca vertiente.
- 5) Principales efectos que causan en la cuenca vertiente los fenómenos considerados, sean causados por eventos torrenciales, o se trate de procesos que tienen lugar en el transcurso entre dos eventos torrenciales consecutivos.
- 6) Principios físicos que permiten analizar los fenómenos comentados en el apartado anterior.
- 7) Principales parámetros que permiten evaluar los efectos causados por los fenómenos que tienen lugar en la cuenca vertiente, tanto de carácter torrencial como no torrencial.

En el caso de la fusión repentina del manto de nieve, los siete aspectos anteriores también se deben considerar, pero con sus peculiaridades, pues se trata de un fenómeno muy específico. Lo mismo ocurre respecto de los desprendimientos de aludes.

Cuando la *ordenación agro-hidrológica* de la cuenca vertiente se plantea como la fase previa de su *restauración hidrológico-forestal*, a las siete consideraciones anteriores, hay que añadir:

- 8) Establecer las técnicas para la prevención o corrección de los efectos previsibles o causados por las precipitaciones torrenciales, o por la fusión súbita del manto de nieve, o por la rotura éste; así como para regular los recursos hídricos durante los periodos entre eventos torrenciales.

En un proyecto convencional de *restauración hidrológico-forestal* de una cuenca vertiente, su planificación previa implica la *ordenación agro-hidrológica* de la cuenca en cuestión y ésta incluye las fases siguientes:

- 1) Estudiar su medio físico con criterios racionales y comprobados.
- 2) Simular su comportamiento ante los tipos de tormenta seleccionados para tal fin.
- 3) Estudiar el mejor uso del suelo en las diferentes áreas de la cuenca y las técnicas más apropiadas para el control del tránsito de las avenidas por su red de drenaje.
- 4) Proponer las medidas pertinentes para el mejor funcionamiento del ciclo del agua en la cuenca y para amortiguar los efectos del geo-dinamismo torrencial en la misma.
- 5) Justificar las propuestas, delimitando el marco de viabilidad de las actuaciones, sin obviar las restricciones temporales que pueda implicar el proyecto de restauración hidrológico-forestal (ejemplo, la primera fase de las repoblaciones).

La Tabla 3.1 sintetiza lo comentado sobre el previsible comportamiento de la cuenca vertiente ante los eventos torrenciales, procesos que tienen lugar en el transcurso entre dos eventos torrenciales consecutivos y fenómenos relacionados con el manto de nieve.

Situación ante los eventos	Mientras acontecen las precipitaciones torrenciales, tanto ordinarias como extraordinarias y extremas			Mientras ocurre la fusión o la rotura del manto de nieve	En el periodo que transcurre entre eventos torrenciales
Análisis temporal	Periodos cortos, a lo sumo de 3 a 4 días			Periodos cortos en el caso de la fusión Casi instantáneo en caso de la rotura	Periodos largos, de meses e incluso de años
Estados físicos del agua ante la situación.	El agua se considera en estado líquido. En la práctica mientras duran las precipitaciones torrenciales carece de sentido plantearse los procesos de evaporación y evapotranspiración, pues su incidencia en tiempo real en el ciclo del agua es prácticamente nula.			1) Durante la fusión del manto de nieve el agua pasa de sólido a líquido. 2) Cuando se fracciona el manto de nieve, éste se encuentra en estado sólido (plástico en sentido estricto).	Se contempla el agua en todo su ciclo. Luego puede estar en estado líquido (en las precipitaciones, escorrentías e infiltraciones), o en estado de vapor (evaporación y transpiración).
Posibles fenómenos o procesos ocasionados en las diferentes situaciones	Avenidas, Inundaciones y anegamientos en áreas dominadas	Desencadenamiento de todo el proceso geo-torrencial (erosión en la cuenca y en sus cauces, transporte por la corriente de los materiales erosionados y sedimentación de los mismos cuando la corriente pierde capacidad para transportarlos)		1) Fusión del manto de nieve, avenidas, inundaciones y desencadenamiento del proceso geo-torrencial. 2) Rotura del manto de nieve: Desprendimiento de aludes.	1) Procesos de evaporación y evapotranspiración en la cuenca vertiente. 2) Recarga y vaciado de acuíferos; formación de los caudales base
Efectos causados por los eventos torrenciales o procesos generados en ausencia de los mismos	1) Formación de fuertes escorrentías. 2) Generación de caudales de avenida 3) Inundaciones.	1) Erosión del suelo en la cuenca por la lluvia y por las escorrentías. 2) Erosión en el lecho y transporte de sedimentos en los cauces 3) Sedimentación en las áreas dominadas.	1) Deslizamientos 2) Movimientos en masa.	1) Reptaciones 2) Generación de caudales de avenida tras la fusión de la nieve 3) Inundaciones y procesos geo-torrenciales en las áreas dominadas 4) Destrucciones causadas por los aludes en su corredor de tránsito y en las áreas dominadas afectadas por ellos.	1) En los periodos entre eventos torrenciales, si las lluvias normales escasean, pueden presentarse situaciones de sequía. 2) En los periodos de sequía pueden reducirse las reservas en los acuíferos, naturalmente o porque la necesidad de agua fuerza su utilización.
Principios físicos utilizados en el análisis de los fenómenos o de los procesos que acontecen entre eventos torrenciales	1) Hidrología de Superficie 2) Hidráulica de cauces abiertos: a) Ecuación de continuidad y b) Ecuación de la dinámica.	1) Estudio de la erosión en la cuenca e Hidráulica de sedimentos (análisis en flujo bifásico) 2) Estudio de torrentes y sus cuencas e Hidráulica torrencial (análisis en flujo monofásico)	1) Mecánica de Suelos (pues es la pérdida de equilibrio de la ladera al cargarse de agua). 2) Estudios de erosión hídrica	1) Física de la formación, evolución y estabilidad del manto de nieve. 2) Tras la fusión del manto de nieve, la avenida se conduce por un cauce, luego: Hidráulica de cauces abiertos e Hidráulica de sedimentos (flujo bifásico) o Hidráulica torrencial (flujo monofásico).	1) Para los procesos de evaporación y evapotranspiración en la cuenca, Hidrología Superficial, acompañada con la Meteorología, Termodinámica y Fisiología vegetal (transpiración). 2) Para los caudales base: Hidrología. 3) Para las recargas de acuíferos Hidrología Subterránea.

Tabla 3.1. Síntesis de las situaciones que se presentan en la cuenca vertiente por la incidencia en ella de los eventos torrenciales, fusiones repentinas o roturas del manto de nieve y procesos que se generan en el periodo que transcurre entre dichos eventos por el funcionamiento normal del ciclo del agua.

Situación ante los eventos	Mientras acontecen las precipitaciones torrenciales, tanto ordinarias como extraordinarias y extremas		Mientras ocurre la fusión o la rotura del manto de nieve	En el periodo que transcurre entre eventos torrenciales	
Parámetros para evaluar los efectos causados por los eventos torrenciales o por los procesos que acontecen entre eventos torrenciales	1) Volúmenes de esorrentía: Q (m ³) 2) Caudales punta de avenidas: q _p (m ³ ·s ⁻¹) 3) Superficies de inundación (ha)	1) Pérdidas de suelo por erosión hídrica en la cuenca: A (t·ha ⁻¹ ·año ⁻¹) 2) Emisión de sedimentos por la cuenca: Y (t) o (m ³) 3) Erosión en los cauces y emisión de sedimentos por la descarga de fondo: Q _s = q _s B (m ³ ·s ⁻¹) o (N·s ⁻¹)	Volumen de tierra movilizada (m ³) o (t).	1) Para la fusión del manto de nieve, los mismos parámetros que para las avenidas, torrenciales y la emisión de sedimentos por la cuenca durante las avenidas. 2) Para los aludes, volumen o masa de nieve movilizada (m ³) o (t).	1) Procesos de evaporación y evapotranspiración en la cuenca vertiente: Ecuaciones específicas y mediciones directas. 1 bis) Balances hídricos (mm) 2) Recarga y vaciado de acuíferos y caudales base: Modelos específicos y mediciones directas.
Técnicas más usuales de prevención, control y corrección de los efectos o procesos analizados	1) Sistemas de alerta y prevención. 2) Técnicas de control de avenidas torrenciales.	1) En la cuenca vertiente: Cubiertas vegetales permanentes (replantaciones) y Conservación de suelos agrícolas. 2) En los cauces: Corrección de torrentes y cursos torrenciales..	Drenajes y modificación del perfil de la ladera, disminuyendo su gradiente	1) Para las crecidas por la fusión del manto de nieve: a) Sistemas de alerta; b) Técnicas de control de avenidas torrenciales. 2) Para los aludes: a) Sistemas de alerta y prevención (medidas pasivas); b) Técnicas de sujeción del manto de nieve; de desviación y retención de aludes (medidas activas).	1) Tratándose de bosques y en situaciones específicas, ordenación de la masa arbolada para regular el consumo de agua por transpiración. 2) El bosque ejerce una protección importante en el control de la cuenca ante el geo-dinamismo torrencial, aunque ello implique un consumo de agua importante por transpiración.
Consideraciones preliminares para planificar la ordenación agro-hidrológica.	Para una cuenca sometida a precipitaciones torrenciales se plantea: 1) Estudiar su medio físico con criterios racionales y comprobados. 2) Simular su comportamiento ante los tipos de tormenta seleccionados para tal fin. 3) Estudiar el mejor uso del suelo en las diferentes áreas de la cuenca y las técnicas más apropiadas para el control de las avenidas en el tránsito por su red de drenaje. 4) Proponer las medidas pertinentes para regular el ciclo del agua y amortiguar los efectos geo-torrenciales en la cuenca. 5) Justificar las propuestas, delimitando el marco de viabilidad de las actuaciones, incluyendo sus limitaciones temporales.		1) Se puede aplicar los mismos criterios que los utilizados para el caso de las precipitaciones torrenciales (columna de la izquierda), particularizados para las cuencas de montaña 2) Tratándose de aludes, se estudia el previsible comportamiento del alud y su incidencia en el área de caída (dominada), atendiendo a los aspectos científico-técnicos y a los objetivos a proteger.	Son de aplicación los epígrafes 1); 3); 4) y 5) de la situación expuesta para las precipitaciones torrenciales (primera columna de esta misma fila). El epígrafe 2) se debe sustituir por diferentes balances hídricos en la cuenca vertiente objeto de estudio, para diferentes situaciones de déficit hídrico.	

Tabla 3.1. (Continuación 1) Síntesis de las situaciones que se presentan en la cuenca vertiente por la incidencia en ella de los eventos torrenciales, fusiones repentinas o roturas del manto de nieve y procesos que se generan en el periodo que transcurre entre dichos eventos por el funcionamiento normal del ciclo del agua.

Situación ante los eventos	Mientras acontecen las precipitaciones torrenciales, tanto ordinarias como extraordinarias y extremas	Mientras ocurre la fusión o la rotura del manto de nieve	En el periodo que transcurre entre eventos torrenciales
Consideraciones a tener en cuenta ante la incidencia de eventos torrenciales extremos en la cuenca vertiente	<p>1) En situaciones de eventos extraordinarios, los observatorios e institutos meteorológicos pueden aportar informaciones interesantes e incluso precisas sobre algunos aspectos científicos concretos del fenómeno. En cuanto a la magnitud de los efectos de dichos fenómenos sobre el terreno, se pueden constatar a partir de trabajos de campo en la cuenca una vez pasado el evento; o de vuelos aéreo-fotográficos realizados a la cuenca tras el evento extremo. Se trata en todo caso de enumerar los efectos, tomar los datos que proporcionan y de clasificarlos. A partir de esta información, se reconstruye a posteriori como se ha comportado la cuenca en cuestión y que medidas propuestas para ella en la ordenación agro-hidrológica han surtido los efectos esperados.</p> <p>2) La ordenación agro-hidrológica no se debe plantear para eventos extremos, sino para eventos torrenciales de recurrencias moderadas a altas. Los eventos extremos se deben asumir como situaciones que puedan proporcionar unos criterios complementarios.</p> <p>3) La ordenación agro-hidrológica de una cuenca vertiente y especialmente la restauración hidrológico-forestal derivada de ella, se debe plantear como una técnica de aproximaciones sucesivas; hasta conseguir una situación para la cuenca, en la que su funcionamiento hidrológico, la protección esperada ante el geo-dinamismo torrencial y de utilización de los recursos agua y suelo en la misma sean acordes con la calidad de vida de sus pobladores.</p>		<p>La situación que se contempla en esta columna es incompatible con la presencia de eventos torrenciales.</p>

Tabla 3.1. (Continuación 2) Síntesis de las situaciones que se presentan en la cuenca vertiente por la incidencia en ella de los eventos torrenciales, fusiones repentinas o roturas del manto de nieve y procesos que se generan en el periodo que transcurre entre dichos eventos por el funcionamiento normal del ciclo del agua.

En los dos últimos párrafos de la última fila de la Tabla 3.1, se comentan un par de aspectos necesarios para comprender el verdadero sentido de la ordenación agro-hidrológica, que se transcriben con algunos comentarios adicionales:

1. La ordenación agro-hidrológica no se debe plantear para eventos extremos, sino para eventos torrenciales de recurrencias moderadas a altas. Los eventos extremos se deben asumir como situaciones que puedan proporcionar unos criterios complementarios. De no ser así, la ordenación resultaría inabordable, por su excesivo coste y porque limitaría en extremo la utilización de la cuenca por su población.
2. La ordenación agro-hidrológica de una cuenca vertiente y especialmente la restauración hidrológico-forestal derivada de ella, se debe plantear como una técnica de aproximaciones sucesivas; hasta conseguir una situación para la cuenca, en la que su funcionamiento hidrológico, la protección esperada ante el geodinamismo torrencial y la utilización de los recursos agua y suelo en la misma sean acordes con la calidad de vida de sus pobladores. *No existe una ordenación agro-hidrológica perfecta, se puede aspirar a la mejor de las posibles.*

Es decir, dado que las actuaciones previstas en una restauración hidrológico-forestal tienen su periodo de ejecución y su periodo de consolidación (ejemplo, las cubiertas arboladas); la cuestión radica en que: ejecutadas las primeras actuaciones previstas en el proyecto de restauración, antes de emprender las siguientes se analice cómo se han adaptado las primeras en la cuenca vertiente. Además, concluidos todos los trabajos de restauración, se debe seguir analizando su evolución y comportamiento, sobre todo tras los eventos extraordinarios que acontezcan en la cuenca y que pueden alterar su funcionamiento. En resumen, es un trabajo continuo de adaptación al medio y de mantenimiento para que se cumplan los objetivos fijados (protección y desarrollo sustentable). La situación se hace más patente con la restauración hidrológico-forestal, pero también es posible asimilar dicha filosofía tras la ordenación agro-hidrológica, si ella implica medidas a adoptar en la cuenca.

3.3. PARÁMETROS Y MODELOS FÍSICOS A CONSIDERAR EN LA ORDENACIÓN AGRO-HIDROLÓGICA DE UNA CUENCA VERTIENTE

Hay cuatro factores, que por afectar directamente en la circulación del agua, se deben considerar en la ordenación agro-hidrológica de una cuenca vertiente. Son los siguientes:

1. La pendiente del terreno, porque de ella depende la velocidad del agua en la ladera (la energía cinética que tiene la lámina de agua en su recorrido).
2. La posición geográfica de la ladera, porque a mayor altitud mayor es el recorrido de la lámina de agua (hay más energía potencial para convertirse en cinética).
3. El tipo de suelo, porque representa el rozamiento que ofrece la solera a la circulación de la lámina de agua y, por tanto, constituye una pérdida de energía. En el caso de que la lámina tenga sobrada energía, supone el inicio de la erosión superficial.
4. La vegetación, por razones similares a las del tipo de suelo.

Asimismo deben intervenir:

5. Unos índices de protección del suelo por la vegetación, por ser una resultante de los factores anteriores.
6. El índice de erosión pluvial del modelo USLE, porque representa la energía con que inciden las gotas de lluvia sobre el suelo.
7. El propio modelo USLE, por ser una combinación de los factores anteriores.
8. La geología y la edafología, la primera por estar relacionada con la resistencia del suelo ante su erosión y la segunda por ser una manifestación del propio suelo.

Pero la ordenación resultaría poco práctica, si junto a los factores que intervienen en los mecanismos que condicionan la estabilidad del suelo (el control de la erosión hídrica del suelo); no se incorpora algún índice que refleje la potencialidad que tiene la cuenca para generar o mejorar su cubierta vegetal, es decir, para restaurarse; por tanto se requiere de:

9. Un índice fito-climático

Los restantes factores a considerar responden al proyecto de restauración de la cuenca una vez ordenada y, como tales, establecen la posición de las actuaciones previstas y las zonas de actuaciones, recomendaciones y sin actuaciones. La Tabla 3.2 recopila todos los factores principales implicados en la ordenación agro-hidrológica.

Altitudes según las zonas de la cuenca	Áreas dominantes (cabeceras)
	Áreas dominadas (valles)
Cubierta vegetal	Estado actual de la vegetación
	Procedencia
	Vocación (forestal, agrícola, otros usos)
Morfología de la cuenca	Pendientes (dependiendo de las zonas de la cuenca)
	Orientación (solana; umbría)
Geología	Áreas con erosiones superficiales
	Áreas con erosiones de fondo
Edafología	Tipos de suelo en las diferentes zonas de la cuenca
Modelos de protección del suelo	Índices de protección del suelo por la vegetación
	Aplicación de ecuaciones paramétricas (tipo USLE o RUSLE)
	Otros modelos de erosión
Índices fito-climáticos	Índices bio-climáticos
	Índices de potencialidad de una estación
Actuaciones en el territorio	En la cuenca vertiente (alternativas posibles y selección de la opción de proyecto)
	En los cauces (alternativas posibles y selección de la opción de proyecto)
Clasificación del área de proyecto	Zonas con actuaciones de restauración
	Zonas de recomendaciones
	Zona sin actuaciones

Tabla 3.2. Principales factores que intervienen en la ordenación agro-hidrológica de una cuenca vertiente

A continuación se muestra en la Tabla 3.3, un esquema corrector de una cuenca hidrográfica de carácter torrencial, basado en una ordenación agro-hidrológica previa de la misma.

Localización		Medidas correctoras		Objetivos
Posición	Espacio	Actuaciones	Especificaciones	
Área dominante de la cuenca hidrográfica	Superficies vertientes	Mantenimiento y creación de cubiertas forestales	Conservación de las masas arboladas y del matorral denso no degradado existentes	Reducir y controlar las escorrentías directas por mejora de la infiltración Controlar la humedad del suelo Controlar la erosión laminar y en regueros Controlar los barrancos incipientes y las erosiones remontantes en las laderas Controlar las cárcavas, conchas de erosión y deslizamientos superficiales. Controlar las erosiones en masa incipientes: reptación y solifluxión
			Repoblaciones forestales	
			Control y aprovechamiento de los pastizales	
			Control de laderas con obras de materiales vivos (vegetación)	
		Medidas de control de las escorrentías y Prácticas de conservación de suelos	Terrazas	
			Bancales	
			Albarradas	
			Drenajes	
	Cauces de drenaje	Obras transversales	Diques de retenida total (en ocasiones actúan como diques de consolidación) Diques de retenida selectiva	Establecer la pendiente de compensación (flujo monofásico) o de equilibrio (flujo bifásico) Controlar la erosión remontante del lecho del torrente Retener sedimentos aguas arriba del dique En los diques de consolidación, estabilizar la erosión en el lecho y los movimientos de las laderas
			Umbrales de fondo	Estabilizar el lecho y controlar su erosión
Obras longitudinales		Protección de márgenes y riberas con vegetación arbolada, acompañada o no de escolleras	Defender de los márgenes de la erosión causada por la abrasión de la corriente	
Área dominada de la cuenca hidrográfica	Obras mixtas	Perfil escalonado de tramos erosionables	Evacuar rápidamente la corriente torrencial en las avenidas por un canal de tramos erosionables.	
	Obras longitudinales	Protección de márgenes y riberas con vegetación arbolada, acompañada o no de escolleras	Defender de los márgenes de la erosión causada por la abrasión de la corriente.	
		Protección de márgenes mediante malecones (escolleras) o espigones	Defensa de los márgenes de las inundaciones y de las erosiones por abrasión de la corriente. Rectificaciones del eje hidráulico del cauce.	

Tabla 3.3. Sistema corrector de una cuenca hidrográfica de carácter torrencial

Los factores indicados en la Tabla 3.2, son esenciales para elaborar la ordenación agro-hidrológica de una cuenca vertiente, pero como se aprecia en la Tabla 3.3, ésta implica también la corrección de los cauces torrenciales que drenan por la cuenca, lógicamente cuando éstos lo precisan. Para ello se necesita conocer su funcionamiento y ello obliga, además de a un reconocimiento previo de los cauces en el terreno para conocer sus secciones y su granulometría, a plantear una simulación para estimar el comportamiento hidrológico de la cuenca y del comportamiento hidráulico de sus cauces de evacuación, ante una serie de precipitaciones torrenciales, de diferentes periodos de retorno, seleccionados con dicho propósito.

Se recomienda utilizar modelos conocidos y cuya aplicación esté pensada para cuencas que se gestionan, de tamaño medio y que requieran una información de partida con posibilidades de disponerla, como el HEC-HMS (Hydrologic Modeling System), U. S. Army Corps of Engineers (2000), para el modelo hidrológico; o el HEC-RAS (River Analysis System), U. S. Army Corps of Engineers (1998), para el modelo hidráulico.

- Con el HEC-HMS se puede simular el comportamiento hidrológico de la cuenca con el uso de suelo que dispone, ante la serie de precipitaciones torrenciales seleccionadas; analizar los resultados y adoptar las medidas oportunas al respecto.
- Con el HEC-RAS se puede simular el tránsito por los cauces de drenaje de la cuenca de las avenidas, correspondientes a la misma serie de precipitaciones torrenciales seleccionadas, lo que permite estimar los diferentes niveles de inundación y las tensiones de arrastre correspondientes.
- Junto a estos modelos, también conviene incorporar un modelo como la USLE, para conocer la erosión hídrica en las diferentes zonas de la cuenca y otro como la MUSLE (que se puede anexionar al modelo hidrológico) para estimar la emisión de sedimentos por la cuenca con la misma serie de precipitaciones torrenciales seleccionadas; aspectos estos últimos que permiten prever el comportamiento geotorrencial de la cuenca ante eventos similares a los de la serie de precipitaciones torrenciales mencionada.

Toda esta información es básica para adoptar decisiones en la ordenación agro-hidrológica de la cuenca. Para utilizar todos estos conceptos de manera coordinada, nuestra unidad de Hidráulica e Hidrología (Departamento de Ingeniería Forestal, E. T. S. Ingenieros de Montes, UPM) desarrolló entre 1985-94 una *metodología integrada para la determinación de los sedimentos aportados por una cuenca* y su programa informático CAUDAL 3 (que se ha comentado al final del epígrafe 2.1.2.2 y cuyo esquema se muestra en la Figura 2.4), para estudiar el comportamiento de la cuenca vertiente y sus cauces de drenaje ante eventos torrenciales con diferentes periodos de recurrencia.

El empleo de estos modelos hidrológicos integrados no es incompatible con el conocimiento adquirido a partir de los modelos hidrológicos distribuidos del comportamiento físico de las cuencas objeto de investigación, que en algunos casos posteriormente también son objeto de ordenación agro-hidrológica. Al contrario, la ordenación utiliza el conocimiento científico obtenido a partir de dichos modelos, distribuidos porque le proporciona certeza científica; pero aprovecha también el conocimiento obtenido en el campo, sobre el manejo de la cuenca por la población,

porque constituye otra realidad que debe emplear y, finalmente, utiliza los modelos integrados comentados en este epígrafe como un instrumento de gestión, que también proporciona confianza, porque son modelos de una escala de menor detalle pero lógicos y físicamente bien fundamentados, que además resultan muy operativos. La ordenación trata de apoyarse en las evidencias científicas, para asegurarse planteamientos reales en la utilización sustentable y segura de la cuenca.

Se finaliza con un ejemplo: la *ordenación agro-hidrológica de la cuenca alimentadora de la rambla del Aljibe* (1991), se trata de un documento incluido en el proyecto de restauración hidrológico-forestal de dicha cuenca y, por tanto, su propósito era servir de apoyo para planificar en ella las acciones restauradoras. Con el fin de centrar su contenido, se inicia presentando un resumen del estado físico que ofrecía la cuenca en la fecha que se redactó su ordenación y de los objetivos que se perseguían con el proyecto.

La cuenca alimentadora de la rambla del Aljibe se ubica en el término municipal de Lubrín en la provincia de Almería, al sureste de España, entre los 2° 0,5' y los 2° 9' de longitud oeste y los 37° 11,5' y los 37° 18' de latitud norte y tiene 88,35 Km² de superficie. Tanto hidrológica como climáticamente se trata de una típica cuenca mediterránea de montaña. Su cota máxima es 1.070 m y la mínima 363 m. Presenta una pendiente media del 26 % y una morfología óvalo-redonda. Sus suelos, fuertemente condicionados por la litología y por sus pendientes, son vulnerables a la erosión y se encontraban muy erosionados. Es frecuente la aparición en la zona de fuertes aguaceros en otoño, normalmente vinculados al efecto de la gota fría. Finalmente la cubierta vegetal de la cuenca estaba en general muy degradada, debido a un inadecuado uso del suelo en el pasado; pero el área en cuestión presentaba una capacidad bioclimática suficiente, como para permitir un estrato arbóreo en amplias zonas de la cuenca; que en la fecha se reducía a relictos de bosque autóctono en un 3 % de su superficie total.

Los objetivos específicos consignados en el proyecto, que eran los habituales en los proyectos de restauración hidrológico-forestal realizados en la época, se concretaban en: 1) El control de la erosión superficial del suelo, compatibilizando con el uso racional de los terrenos de la cuenca; 2) La regularización de las crecidas en su red de drenaje, así como el transporte de los sedimentos por las mismas y 3) El mejor aprovechamiento de sus recursos hídricos. Pero el verdadero objetivo del proyecto era la recuperación ecológica de la cuenca, para impedir que entrara en un proceso de desertificación; por lo que el contenido principal del proyecto se centró en la recuperación de la cubierta arbolada de la cuenca (cuyo previsible efecto en el régimen hidrológico de la misma y en la conservación de sus suelos se simuló); aunque se proyectaron también algunas obras transversales a los cauces, para retener sedimentos en secciones estratégicas.

En la ordenación agro-hidrológica de la cuenca de la rambla del Aljibe se utilizaron los factores que se muestran en la Tabla 3.2 y también se empleó *la metodología integrada para la determinación de los sedimentos aportados por una cuenca* y su programa informático CAUDAL 3, para analizar el comportamiento de la cuenca ante eventos torrenciales con diferentes periodos de retorno. Con estas herramientas, considerando el estado físico de la cuenca en cuestión y los objetivos establecidos en el proyecto, su ordenación agro-hidrológica se concretó en el contenido que aparece en la Tabla 3.4.

Altitud (m)	Cubierta vegetal		Pendiente p (%)	Tipos de suelo	Protección del suelo	Índices bio-climáticos (en UB unidades bio-climáticas)	Actuaciones en el territorio
	Estado actual	Vocación			Aplicación USLE		
Relictos del bosque primitivo en áreas dominantes	Encinar (a veces aclarado)	Forestal	Cualquiera (lo normal elevada)	Suelos pardos profundos	Buena <10 t/ha-a	>2,5 UB	Mantener y mejorar el bosque de encina
	Pinar aclarado			Rendzinas		>1,5 UB	Mantener y mejorar el bosque de pinar
> 600 Área dominante	Matorral serial	Forestal	p < 30	Suelos pardos jóvenes bastante profundos	Regular >10 t/ha-a	En general > 2,0 UB Áreas más soleadas del noreste > 1,0 UB	Repoblación Forestal Preparación del suelo: en cuencas de contorno. Plantación: <i>Pinus halepensis</i> y en zonas ecológicas especiales <i>Quercus ilex</i>
			30<p<40	Rendzinas (en ocasiones Rankers de pendiente)	Escasa >10 t/ha-a		Repoblación Forestal Preparación del suelo: en banquetas. Plantación: <i>Pinus halepensis</i>
			p > 40				Repoblación Forestal Preparación del suelo: ahoyado mecánico. Plantación: <i>Pinus halepensis</i>
	Antiguos balates de cultivos abandonados		Cualquiera (lo normal p > 30)	Suelos antrópicos sobre Rankers en pendiente	Lo normal es >10 t/ha-a		Repoblación Forestal Preparación del suelo: ahoyado mecánico. Plantación: <i>Pinus halepensis</i> y en zonas ecológicas especiales con <i>Quercus ilex</i> .
	Cultivos agrícolas	Agrícola	Variable pero < 30	Suelos antrópicos profundos	Variable según la pendiente		Mantener los cultivos si son de interés, con prácticas de conservación de suelos pertinentes
	Escasa vegetación de riberas	Forestal	Variable	Depósitos modernos	Escasa		Galerías con vegetación arbolada de raíz pivotante

Tabla 3.4. Ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente a la rambla del Aljibe (Almería, España, 1991)

(Continuación)

Altitud (m)	Cubierta vegetal		Pendiente p (%)	Tipos de suelo	Protección del suelo	Índices bio-climáticos (en UB unidades bio-climáticas)	Actuaciones en el territorio
	Estado actual	Vocación			Aplicación USLE		
< 600 Área dominada	Matorral serial	Forestal	p < 30	Suelos pardos (lo normal calcimórficos)	Regular >10 t/ha-a	Al norte y centro de la cuenca > 1,5 UB Al sur y oeste la cuenca > 2,0 UB En las áreas más soleadas del noreste >1,0 UB	Repoblación Forestal Preparación del suelo: en cuencas de contorno. Plantación: <i>P. halepensis</i> y en zonas ecológicas especiales con <i>Quercus ilex</i> o <i>Ceratonia siliqua</i> en las zonas más cálidas
			30<p<40	Rendzinas (en ocasiones Rankers de pendiente)	Escasa >10 t/ha-a		Repoblación Forestal Preparación del suelo: en banquetas. Plantación: <i>Pinus halepensis</i>
			p > 40	Rendzinas (abundando Rankers de pendiente)			Repoblación Forestal Preparación del suelo: ahoyado mecánico. Plantación: <i>Pinus halepensis</i>
	Antiguos balates de cultivos abandonados Matorral serial		Cualquiera pero en general elevada	Suelos antrópicos sobre rendzinas o rankers	Regular Normalmente > 10t/ha-a		Repoblación Forestal Preparación del suelo: ahoyado mecánico. Plantación: <i>P. halepensis</i> y en zonas especiales con <i>Quercus ilex</i> o <i>Ceratonia siliqua</i>
				Muy someros y erosionados	Escasa > 10t/ha-a		<1,0 UB Bajo
	Barrancos con balates en escalera	Forestal/ Agrícola marginal	Elevada p>12	Suelos antrópicos generados por la nivelación del terreno	No procede, pues no corresponde al modelo		Bajo, pero mejorando el drenaje en el barranco se puede elevar

Tabla 3.3. (Continuación 1) Ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente a la rambla del Aljibe (Almería, España, 1991)

(Continuación)

Altitud (m)	Cubierta vegetal		Pendiente p (%)	Tipos de suelo	Protección del suelo	Índices bio-climáticos (en UB unidades bio-climáticas)	Actuaciones en el territorio
	Estado actual	Vocación			Aplicación USLE		
< 600 Área dominada	Cultivos agrícolas	Agrícola	Variable pero < 30 p<12 12<p<20 p>20	Suelos antrópicos profundos (variable según zonas)	Variable según la pendiente <10 t/ha·a >10 t/ha·a >10 t/ha·a	La práctica del cultivo lo adecua	Mantener los cultivos si son de interés, con prácticas de conservación de suelos pertinentes
	Escasa vegetación de riberas	Forestal	Variable	Depósitos modernos	Escasa	>1,0 UB	Galerías con vegetación arbórea de raíz pivotante

Tabla 3.3. (Continuación 2) Ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente a la rambla del Aljibe (Almería, España, 1991)

Centrándose para terminar en el proyecto de restauración hidrológico-forestal de la cuenca de la rambla del Aljibe, en relación con el objetivo de recuperar la cubierta arbolada en la cuenca, se proyectaron 48,06 Km² de repoblación forestal (44,88 Km² en áreas de monte y las restantes 3,14 Km² en zonas de riberas) con diferentes tipos de preparación del suelo dependiendo de la pendiente del terreno (líneas de contorno; banquetas; ahoyado mecánico). Para la plantación en las áreas de monte se eligió como especie predominante el *Pinus halepensis* (autóctona, heliófila, xerófila y con un temperamento muy adaptado al clima mediterráneo), aunque en los rodales con mejor microclima se propuso el *Quercus ilex rotundifolia* o el *Ceratonia siliqua* (este último en las zonas más cálidas); para las riberas se eligió un conjunto de especies ripícolas con predominio de los géneros *Pópulus*, *Salix* y *Tamarix*

El proyecto contempló también la construcción de tres diques de retención de sedimentos en el cauce principal de la rambla del Aljibe, seis diques más con la misma finalidad en su primer afluente importante por la derecha y otros tres diques también con igual objetivo en su segundo afluente importante por el mismo margen; además de la reconstrucción de las áreas abancaladas en el pasado y abandonadas en la fecha de redacción del proyecto, para su posterior repoblación forestal.

4 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LOS BENEFICIOS PREVISIBLES EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA CON LA APLICACIÓN DE LAS MEDIDAS RESTAURADORAS, ADOPTADAS CON LOS CRITERIOS DEFINIDOS EN SU ORDENACIÓN AGRO-HIDROLÓGICA

En los países de las áreas montañosas de Europa como Austria, Alemania (Baviera), España, Francia, Italia, Suiza, etc., así como en el Japón, se han desarrollado *metodologías*, para estimar los beneficios de los proyectos de corrección de torrentes de montaña y de sus cuencas vertientes, basadas en el análisis económico de Beneficios/Costes (B/C), entre los beneficios que supone evitar los riesgos previsibles en las áreas dominadas de los torrentes, mediante la corrección de los mismos en sus áreas dominantes y las inversiones que representan las obras y trabajos de dichas correcciones. La razón es obvia, las obras se realizan para proteger los asentamientos y las infraestructuras situadas en zonas de riesgo, pero en general se trata de actuaciones muy costosas, cuyos presupuestos están obligados a justificar las Administraciones que los contratan. Desgraciadamente, también se pueden presentar situaciones, en las que la restauración se ha llevado a cabo tras ocurrir un accidente que ha sido necesario reparar; lo que proporciona la posibilidad de estimar la rentabilidad de las inversiones a través de las obras y trabajos de reparación, o de nueva planta si anteriormente no existieran.

En España plantearon una *metodología* de este tipo **Catalina & Vicente** (2001), para valorar la rentabilidad de la continuación de los trabajos de repoblación en los montes que vierten a la ciudad de Málaga, atendiendo a los beneficios previsibles que con ellos se aportaría a la ciudad, al reducir el grado del geo-dinamismo torrencial de los cursos que drenan por dichos montes, cuando en los mismos tienen lugar precipitaciones torrenciales.

Ante esta situación, se contempla que en países de América Latina se conservan bosques naturales, que protegen áreas turísticas donde se asientan poblaciones, como es el caso de la ciudad de Ushuaia (Argentina), donde la *metodología* anterior se puede aplicar en sentido inverso al planteado para la protección de la ciudad de Málaga. En este caso, aguas arriba de la ciudad de Ushuaia existe un bosque natural de *Nothofagus*, que protege a la ciudad porque reduce el geo-dinamismo torrencial de los cursos que vierten a ella, cuando en sus cuencas alimentadoras suceden eventos torrenciales.

- Estimando los beneficios que dicho bosque de *Nothofagus* le aporta a la ciudad, al evitarle los daños que de otro modo le podrían causar el geo-dinamismo torrencial de los cursos que vierten a ella, para eventos torrenciales con diferentes periodos de retorno.
- Valorando en términos económicos dichos beneficios, en función del coste de reparación de los daños (que se han evitado por la presencia del bosque de *Nothofagus*).
- Se puede estimar la rentabilidad del bosque en cuestión, desde el punto de vista de la protección que le ocasiona a la ciudad ante el geo-dinamismo torrencial, que se puede desencadenar si suceden eventos torrenciales en sus cuencas vertientes.
- Conocida la rentabilidad, es posible estimar el capital que supone el bosque de *Nothofagus*. Aspecto que se debe valorar, aunque nunca se conseguirá hacerlo en su totalidad; porque en el caso de que desapareciera el bosque, posiblemente una infraestructura que cumpla con todas sus funciones que él realizaba, en la práctica resultará inviable tanto técnica como económicamente.

El bosque de *Nothofagus* presta un gran servicio como infraestructura a la ciudad, además de embellecerla, y, de no existir, sus efectos se dejarían sentir y su implantación tendría un coste muy elevado.

Tratándose de cuencas en las que predomina su carácter agronómico, **Aguiló (1976)**¹, planteó una *metodología*, originalmente pensada para cuencas vertientes con clima mediterráneo y con cierto grado de degradación en sus áreas dominantes a causa del inadecuado uso de sus suelos en el pasado; lo que obliga a su adaptación cuando se pretende aplicar en otros climas y a otras circunstancias. Sin embargo, la metodología en cuestión presenta suficientes atractivos, para tratar de extender su aplicación; porque su estructura es lógicamente sólida y su objetivo principal es definir los beneficios que la restauración hidrológico-forestal de las áreas dominantes o de cabecera de la cuenca, ofrece a la conservación del suelo y del agua en toda la cuenca y a la mitigación de los daños en los cultivos para lluvias torrenciales ordinarias (no catastróficas) en las áreas dominadas.

Las dos metodologías resultan compatibles y complementarias, porque:

- Mientras la primera está diseñada para evaluar los daños que se evitan en la cuenca (especialmente en las áreas dominadas), al conseguir un mejor control de los caudales líquidos y del geo-dinamismo torrencial en la misma ante la aparición de eventos torrenciales.
- La segunda (que también se apoya en los efectos que tiene la restauración hidrológico-forestal sobre el control del geo-dinamismo torrencial en la cuenca, cuando en ésta suceden eventos torrenciales) se decanta en la repercusión de dichos efectos en la conservación de los recursos agua y suelo en la cuenca, es decir, en su aprovechamiento sustentable.

En este capítulo se habla de los riesgos evitados o de los beneficios obtenidos, tras la ejecución en la cuenca vertiente de las actuaciones consignadas en su proyecto de restauración hidrológico-forestal, porque de este modo se comprende mejor la lógica de ambas metodologías; pero tampoco hay que descartar la aplicación de las mismas en una ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente, especialmente cuando se trata de la metodología planteada por **Aguiló**; pero en cualquier caso, ambas metodologías necesitan evaluar como inversiones, lo que posee la cuenca y le sirve para protegerse ante la aparición en ella del geo-dinamismo torrencial (por ejemplo, un bosque situado en su cabecera, sea natural o procedente de repoblación, en el primer caso se computa como inversiones anteriores; en el segundo como inversiones de proyecto). Además estas metodologías necesitan de un análisis temporal, al ser aleatorios los eventos torrenciales causantes del geo-dinamismo torrencial en la cuenca. Se puede elegir como periodo de análisis el que se necesita para consolidarse las obras y trabajos consignados en el proyecto de restauración hidrológico-forestal tras su ejecución, que normalmente coincide con el turno de las especies utilizadas en las repoblaciones forestales.

A continuación se muestra un cuadro resumen con los pasos lógicos para abordar el análisis económico de los beneficios previsibles en la cuenca hidrográfica, con la aplicación de las medidas restauradoras, adoptadas con los criterios definidos en su ordenación agro-hidrológica (Tabla 4.1); en la línea definida en el esquema de la Tabla 3.1, que establece los principales aspectos a considerar en la ordenación agro-hidrológica de una cuenca.

¹ En su época de jefe de la Sección de Conservación de Suelos del ICONA (Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza) del Ministerio de Agricultura de España

Situación ante los eventos	Mientras acontecen las precipitaciones torrenciales, tanto ordinarias como extraordinarias y extremas				Mientras ocurre la fusión o la rotura del manto de nieve		En el periodo que transcurre entre eventos torrenciales	
Análisis temporal	Periodos cortos, a lo sumo de 3 a 4 días				Periodos cortos en la fusión Casi instantáneo en la rotura		Periodos largos, de meses e incluso de años	
Tipo de evento	Eventos ordinarios		Eventos extraordinarios o extremos		Eventos extraordinarios o extremos		Eventos ordinarios	
Principales fenómenos que se manifiestan en la cuenca	Incremento del caudal líquido en: a) Volumen de escorrentía b) Formación de caudales de avenida c) Áreas de inundación.	Aparición del geo-dinamismo torrencial: Erosión, transporte de sedimentos y sedimentación en áreas dominadas.	El incremento de los caudales líquidos y del geo-dinamismo torrencial es extraordinario	Deslizamientos y movimientos en masa.	La fusión súbita del manto de nieve causa un incremento del caudal líquido y del geo-dinamismo torrencial..	Caída de aludes	Fenómenos de evaporación y evapotranspiración en la cuenca vertiente	Recargas de acuíferos y formación de caudales base.
Mitigación de los efectos (daños) en la cuenca como consecuencia de la restauración hidrológico-forestal (H & F) de la misma.	a) Reducción de los volúmenes de escorrentía Q (m^3) y de los caudales punta de avenida q_p ($m^3 s^{-1}$). b) Reducción de las áreas de inundación.	a) Reducción de la erosión superficial ($t ha^{-1} año^{-1}$) en la cuenca. b) Reducción de la emisión de sedimentos por la cuenca (m^3) o (t)	Existe reducción en la formación del caudal líquido y en el geo-dinamismo torrencial de la cuenca; aunque los daños resulten cuantiosos	a) La restauración H & F no influye en deslizamientos rotacionales. b) En los casos restantes reduce los efectos. En deslizamientos (m^3). En movimientos en masa: ($m^3 \cdot s^{-1}$).	Todo lo dicho en las columnas 2 y 3 de esta fila es de aplicación también para esta situación.	El bosque regula la metamorfosis del manto de nieve, evitando la formación de aludes y reduciendo la sublimación directa (m^3).	a) En las primeras fases de la repoblación, hay un incremento de la evapotranspiración y una reducción del agua disponible en la cuenca. a bis) La reducción afecta los acuíferos y caudales base. b) Conforme la repoblación se consolida mejora el micro-clima y se incrementa el agua disponible en la cuenca.	
Criterios físicos para evaluar la reducción de los efectos o daños como consecuencia de la restauración hidrológico-forestal (H & F) de la cuenca	Aplicación de modelos hidrológicos integrados en conjunción con modelos paramétricos para estimar la erosión en la cuenca y para evaluar la emisión de sedimentos por la misma, para las situaciones anterior y posterior a la restauración hidrológico-forestal (H & F) de la cuenca, comprobando los resultados obtenidos, con mediciones in situ.		Se pueden aplicar los mismos criterios que en las dos columnas anteriores de esta misma fila; aunque su precisión sea menor.	a) La restauración H & F no puede controlar los deslizamientos rotacionales. b) En los casos restantes reduce los efectos, pero su evaluación se debe hacer midiendo directamente.	Todo lo dicho en las columnas 2 y 3 de esta fila es de aplicación también para esta situación.	a) Medir los efectos in situ. b) Metodologías indirectas ad hoc para evaluar el efecto del bosque en la inmovilización del manto de nieve para evitar los aludes..	1) Modelos ad hoc de balances hídricos para evaluar las reservas de agua en la cuenca antes de su repoblación y en los años siguientes a su ejecución, hasta que la repoblación se consolide; comprobando los resultados con mediciones in situ. La investigación debe abarcar todo el turno de la especie utilizada en la repoblación.	

Tabla 4.1. Resumen de los criterios aplicables en del análisis económico de la restauración hidrológico-forestal de una cuenca hidrográfica

Situación ante los eventos	Mientras acontecen las precipitaciones torrenciales, tanto ordinarias como extraordinarias y extremas	Mientras ocurre la fusión o la rotura del manto de nieve	En el periodo que transcurre entre eventos torrenciales
Análisis temporal	Periodos cortos, a lo sumo de 3 a 4 días	Periodos cortos en la fusión Casi instantáneo en la rotura	Periodos largos, de meses e incluso de años
Criterios económicos para evaluar los beneficios de la restauración hidrológico-forestal (H & F) de una cuenca vertiente	<p>1) En cuencas en las que el objetivo principal es el de evitar o mitigar los efectos geo-torrenciales que afecten directamente a zonas pobladas o infraestructuras situadas en áreas dominadas de la cuenca, se opera como sigue:</p> <p><i>a)</i> Se evalúan en términos monetarios los riesgos que se evitan en las áreas dominadas, con las actuaciones definidas en el proyecto de restauración hidrológico-forestal y efectuadas en las áreas dominantes: B</p> <p><i>b)</i> Se determina la inversión que supone las actuaciones del proyecto realizadas en las áreas dominantes: C.</p> <p><i>c)</i> La relación B/C, trasladado al año uno, define la rentabilidad del proyecto.</p> <p>2) En las cuencas en las que el objetivo se centra en el aprovechamiento sustentable de la cuenca (<i>metodología</i> de Aguiló, 1976), se opera como sigue:</p> <p><i>a)</i> Se evalúan en términos monetarios los beneficios que suponen las actuaciones hidrológico-forestales efectuadas en el área dominante de la cuenca, en la protección de los suelos, el mejor aprovechamiento del agua de lluvia y la disminución de riesgos en las cosechas en la cuenca: B</p> <p><i>b)</i> Se determina la inversión que supone las actuaciones del proyecto de restauración realizadas en la cuenca: C.</p> <p><i>c)</i> La relación B/C, trasladado al año uno, define la rentabilidad del proyecto.</p> <p>3) Las dos metodologías son complementarias y compatibles y las dos también resultan tanto menos precisas cuanto el evento torrencial es más extremo.</p>	<p>1) Los aludes se corrigen cuando afectan a áreas pobladas o a infraestructuras viales o a estaciones de invierno.</p> <p>2) El análisis económico estima los daños que se pueden evitar en las áreas amenazadas por los aludes, si se realizan actuaciones para evitar que se produzcan en las zonas de desprendimiento; o si se han desprendido, para desviar sus recorridos fuera de las zonas de peligro para la población.</p> <p>La evaluación en términos monetarios de los daños, evitados con las actuaciones del proyecto, dividido por la inversión de las obras de defensa realizados, representa el análisis B/C del proyecto.</p>	<p>1) No existe un modelo concreto y es difícil plantearlo, porque el tiempo que se necesita para comprobarlo coincide con el periodo que dura la propia repoblación.</p> <p>2) De los resultados en cuencas comparadas se intuye que el modelo adoptado ad hoc, tendría interpretaciones muy diferentes según el tiempo utilizado para su evaluación.</p>
Análisis temporal de los beneficios de la restauración hidrológico-forestal (H & F) de una cuenca vertiente	Determinan los beneficios totales como suma de los beneficios parciales durante el tiempo de consolidación del proyecto de restauración hidrológico-forestal (H & F) de la cuenca, restando los gastos de manteniendo en el mismo periodo y todo ello trasladarlo al año uno, en el que se realizan las inversiones del proyecto. Posteriormente se aplica un análisis, como el de B/C o bien la TIR.		

Tabla 4.1. (Continuación) Resumen de los criterios aplicables en del análisis económico de la restauración hidrológico-forestal de una cuenca hidrográfica

4.1. ANÁLISIS DE LOS EFECTOS QUE EJERCEN LAS MEDIDAS DE CONTROL DEL GEO-DINAMISMO TORRENCIAL EN LA CUENCA VERTIENTE, EN LA PROTECCIÓN DE SUS ÁREAS DOMINADAS

La valoración de los daños que se pueden esperar en la cuenca vertiente a lo largo de un horizonte temporal suficientemente largo, depende principalmente de tres factores:

1. Las condiciones climáticas y meteorológicas del lugar
2. Las condiciones de la cuenca vertiente receptora de las precipitaciones
3. La ordenación del territorio existente en las zonas dominadas

El primero de los factores es prácticamente fijo y se escapa de un control local o regional; en todo caso, podría estar condicionado por el efecto del *cambio climático* y su posible manejo sería a escala *mundial*. En cambio los otros dos factores si pueden alterarse, controlarse o mejorarse a través de la incidencia del factor humano, luego su manejo resulta *local*.

La ordenación del territorio nos crea un escenario de riesgo ante los eventos extraordinarios, en el que es posible esperar una respuesta diferente de los daños, causados por los eventos torrenciales que sucedan en el transcurso del tiempo, en función de la incidencia que ejercen las condiciones en las que se encuentra la cuenca vertiente.

Siguiendo el esquema de **Sarandón, Gaviño Novillo y Guerrero Borges** (2006), se pueden distinguir cuatro zonas por la magnitud de los daños en función del índice de precipitación (magnitud del evento meteorológico) y de las condiciones en las que se encuentra la cuenca vertiente en la que se producen las avenidas. Estas son: 1) *zona de eventos menores*, 2) *zona de eventos mayores*, 3) *zona de desastres* y 4) *zona de catástrofes*. (Figura 4.1)

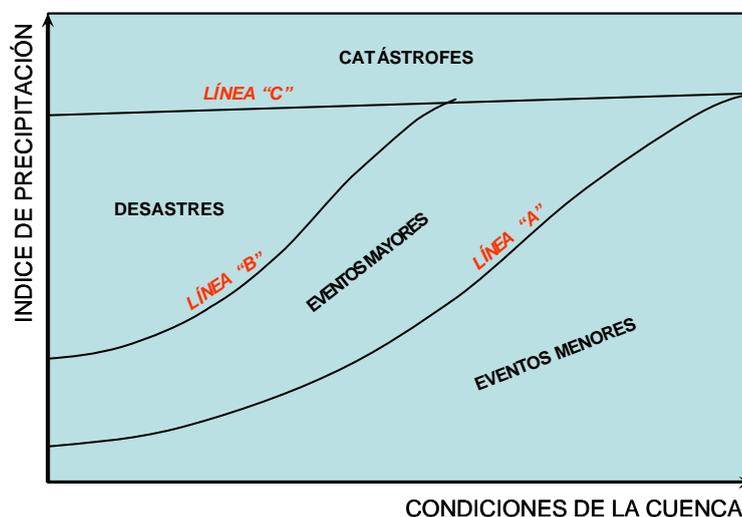


Figura 4.1. Esquema de las diferentes zonas de la cuenca vertiente por la magnitud de los daños esperables en función del índice de precipitación (magnitud del evento meteorológico) y de las condiciones de la cuenca vertiente donde se generan las avenidas **Sarandón, Gaviño Novillo y Guerrero Borges** (2006)

Estas zonas están delimitadas en la Figura 4.1 por las líneas A, B y C cuyo trazado depende de la ordenación del territorio desarrollado en el área de análisis. De este modo, una ordenación conservadora, que no permitiese la ocupación de las áreas de peligro, disminuiría

el riesgo de daños en la población y en las infraestructuras, por lo que, aunque los eventos meteorológicos fuesen de magnitud importante, los posibles daños que tuvieran lugar en el escenario serían casi siempre pequeños. En esta situación las líneas A, B y C se ubican en una posición elevada del eje de las ordenadas del esquema anterior (Figura 4.2).

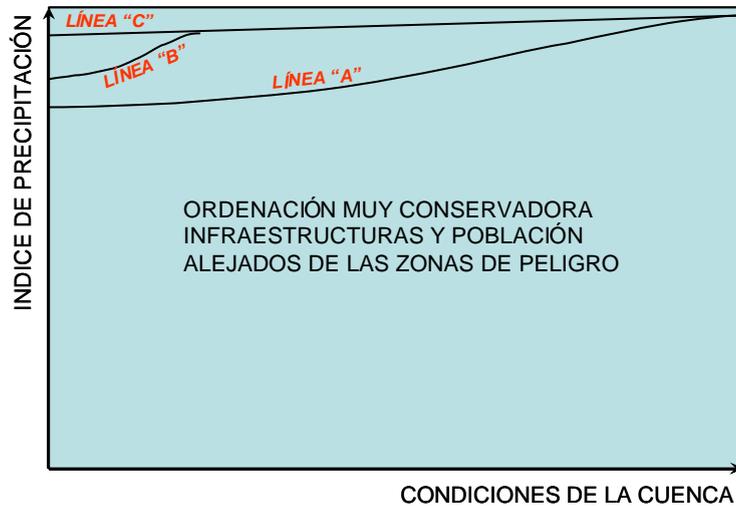


Figura 4.2. Esquema de las diferentes zonas de la cuenca vertiente por la magnitud de los daños esperables en función del índice de precipitación (magnitud del evento meteorológico) y de las condiciones de la cuenca vertiente donde se generan las avenidas, para una ordenación del territorio conservadora en su área dominada.

Por el contrario, una ordenación permisiva o incluso agresiva pondría en riesgo las áreas ocupadas por las actividades antrópicas y el nivel de daños sería grande o catastrófico, incluso con magnitudes de precipitación moderadas. En este caso las líneas A, B y C bajarían en el eje de las ordenadas del esquema inicial (Figura 4.1) de las diferentes zonas de la cuenca por la magnitud de los daños esperables (Figura 4.3).

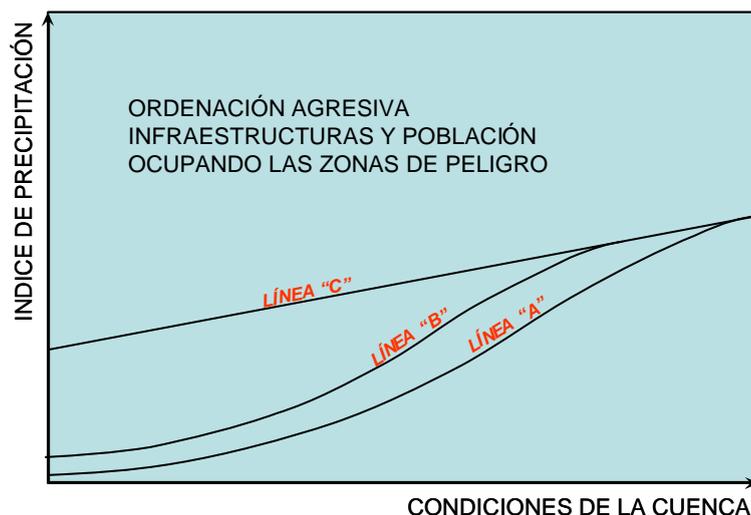


Figura 4.3. Esquema de las diferentes zonas de la cuenca vertiente por la magnitud de los daños esperables en función del índice de precipitación (magnitud del evento meteorológico) y de las condiciones de la cuenca vertiente donde se generan las avenidas, para una ordenación del territorio permisiva o agresiva en su el área dominada.

Ante una situación dada por la ordenación de su territorio, el nivel de los daños esperables en la cuenca vertiente depende de las condiciones en las que se encuentre.

- Una línea vertical al eje de las abscisas en el esquema anterior, permite realizar una valoración de dichas condiciones, atendiendo a la intersección de la misma con las líneas A, B y C, que proporciona unos segmentos que se corresponden con los diferentes tipos de daños (Figura 4.4).
- Si en el eje de las ordenadas, que inicialmente se le ha hecho corresponder con el índice de precipitación, en lugar de transportar el valor de la magnitud del evento torrencial, se transporta el valor de su probabilidad, la longitud de los diferentes segmentos L_i define la cantidad de daños esperables de cada tipo.
- Si se valora económicamente cada tipo de daño (V_i) y se multiplica por su frecuencia (longitud del segmento, L_i), se tiene, tras sumar los valores correspondientes a los cuatro productos parciales, un valor del daño total esperable (DTE.) para una situación de la cuenca en cuestión con una ordenación del territorio y unas condiciones determinadas en de la misma, definida por la expresión matemática siguiente:

$$DTE = V_{D.MENOR} \cdot L_{D.MENOR} + V_{D.MAYOR} \cdot L_{D.MAYOR} + V_{D.DESASTRE} \cdot L_{D.DESASTRE} + V_{D.CATÁSTROFE} \cdot L_{D.CATÁSTROFE}$$

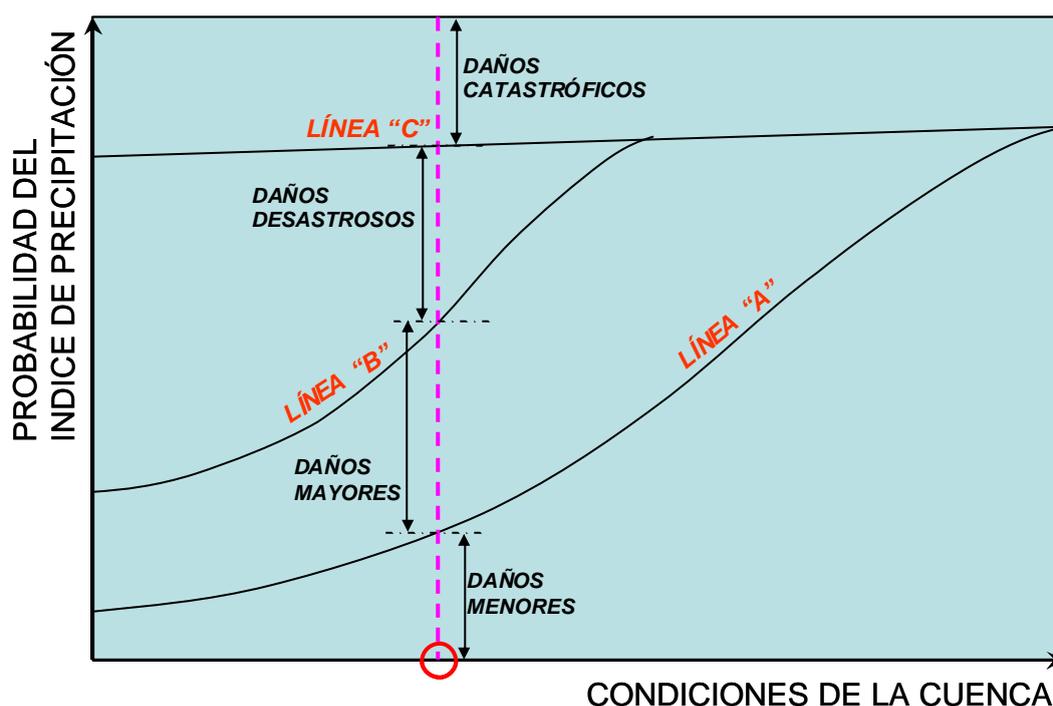


Figura 4.4. Daño total esperable (DTS) como suma de los productos parciales de la valoración económica de cada tipo de daño V_i (menor, mayor, desastre, catástrofe) por la frecuencia de los mismos L_i (que se refleja en el eje de las ordenadas).

Evidentemente, el problema radica en cuantificar tanto el valor económico de cada tipo de daño V_i , como la frecuencia del segmento L_i del gráfico de la Figura 4.4 y establecer una metodología que permita valorar las condiciones de la cuenca mediante algún tipo de indicador que refleje su situación, así como poder disponer de los criterio objetivos para trazar las líneas A, B y C del esquema adoptado en los gráficos de las Figuras 4.1 al 4.4.

4.1.1. Particularización del análisis económico a la protección que ejerce a la población de Ushuaia el bosque de *Nothofagus* situado aguas arriba de la misma en la cuenca vertiente al arroyo de Buena Esperanza.

Particularizando el análisis económico a la cuenca vertiente del arroyo de Buena Esperanza, dentro del esquema planteado por Sarandón, Gaviño Novillo y Guerrero Borges, se puede representar gráficamente la situación, tanto anterior como la previsible, de los daños esperables en la ciudad de Ushuaia, ubicada en el área dominada la mencionada cuenca vertiente, ante la ocurrencia en ésta de eventos torrenciales extraordinarios.

La Figura 4.5 representa la situación inicial, cuando el límite urbano de la población de Ushuaia se situaba algo apartado del cono de deyección del arroyo de Buena Esperanza. Las líneas que representan los límites de los diferentes riegos para la población y las infraestructuras ante eventos torrenciales, se sitúan en la parte superior del eje de las ordenadas (probabilidad del índice de precipitación) dentro del gráfico. Por otro lado, las buenas condiciones en las que se encontraba la cuenca vertiente, todavía en muchas partes antrópicamente inalterada, fijan las condiciones de la misma en un valor alto dentro del eje de las abscisas correspondiente.

SITUACIÓN DE USHUAIA Y LA CUENCA DE BUENA ESPERANZA EN 1947
ANTES DE LA URBANIZACIÓN DEL CONO DE DEYECCIÓN

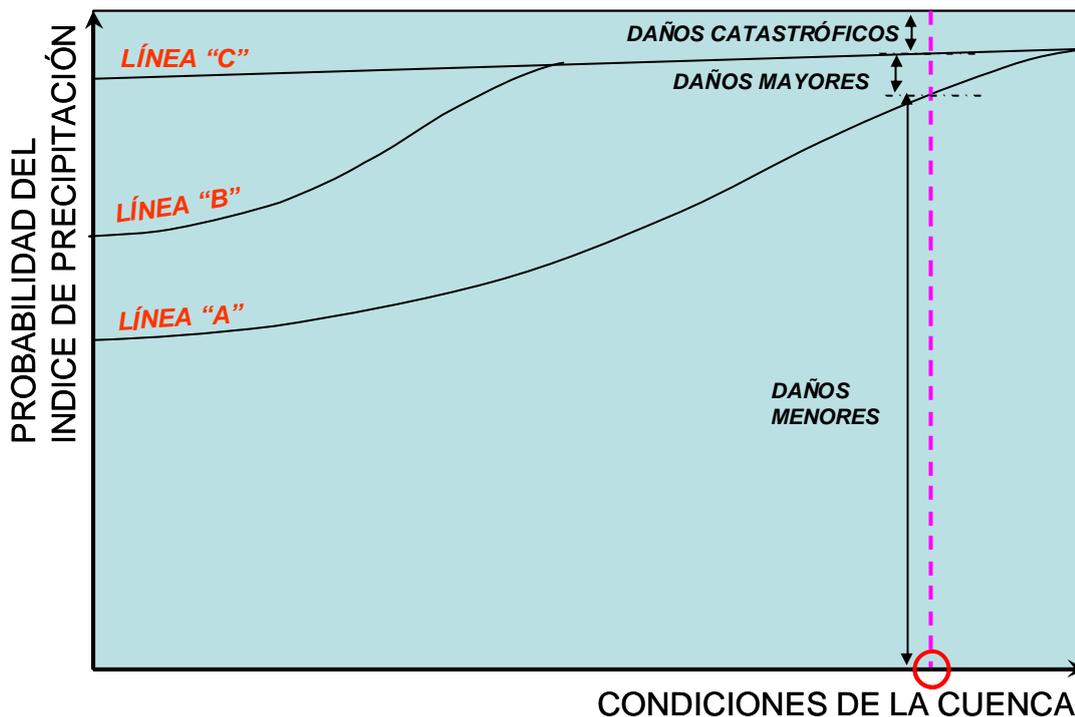


Figura 4.5. Situación inicial de la cuenca vertiente del arroyo de Buena Esperanza. Los daños esperables en la ciudad de Ushuaia, ubicada en su área dominada, ante la ocurrencia en la cuenca de eventos torrenciales extraordinarios, son reducidos; porque la ciudad está apartada de la zona de riesgos y la cuenca se encuentra convenientemente protegida con el bosque de *Nothofagus*

En la situación actual, la progresiva urbanización del cono de sedimentación del arroyo de Buena Esperanza, como resultado de la ampliación del área urbana de la ciudad de Ushuaia en dicha dirección, ha variado el esquema de ordenación territorial y los riesgos ante eventos torrenciales han aumentado. Esto se refleja en un descenso en el eje de las ordenadas de las líneas A, B y C.

El estado de protección de la cuenca vertiente no ha sufrido variaciones muy importantes, pero los daños previsibles son mayores, dada la proximidad de las edificaciones al cauce del arroyo de Buena Esperanza. Esto hace que, aunque los valores de los caudales líquidos y sólidos esperables en el arroyo, ante la ocurrencia en la cuenca de eventos torrenciales extraordinarios, sean similares a los que se presentaban en el pasado; los daños ocasionados se incrementarán al variar la posición de las líneas A, B y C, situación que se refleja gráficamente en la Figura 4.6.

SITUACIÓN DE USHUAIA Y LA CUENCA DE BUENA ESPERANZA EN LA ACTUALIDAD TRAS LA URBANIZACIÓN DEL CONO DE DEYECCIÓN

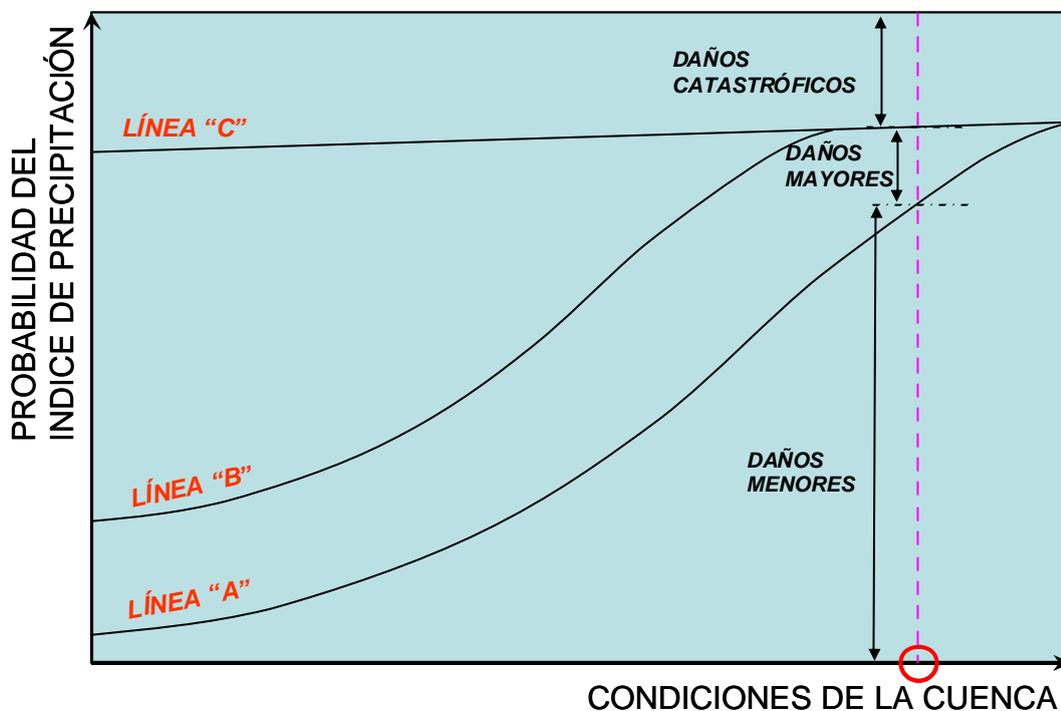


Figura 4.6. Situación actual de la cuenca vertiente del arroyo de Buena Esperanza. Los daños esperables en la ciudad de Ushuaia se incrementan respecto a la situación inicial, para un mismo régimen geo-torrencial, porque la ciudad se ha expandido hacia la zona ocupada por el cono de sedimentación del arroyo de Buena Esperanza, aunque no hayan cambiado las condiciones de protección de la cuenca vertiente.

Si en el futuro se planteara una intervención en la cuenca vertiente del arroyo de Buena Esperanza, para dar salida a la demanda de área urbana e instalaciones turísticas de la ciudad y ésta se expansionara por la superficie actualmente ocupada por el bosque de *Nothofagus*; esto podría significar un descenso de las condiciones de protección de la cuenca vertiente ante el geo-dinamismo que podrían causarle los eventos torrenciales extraordinarios que sucedan en la misma, que se traduciría en un incremento en los valores de los caudales líquidos y sólidos emitidos por el arroyo y, en consecuencia, en un aumento de los daños ocasionados a

la población y a las infraestructuras establecidos de acuerdo con la nueva ordenación territorial, lo que se muestra en el gráfico de la Figura 4.7, en la que el eje vertical a las abscisas se ha desplazado hacia la derecha, para indicar las peores condiciones de protección de la cuenca vertiente respecto de la situación inicial.

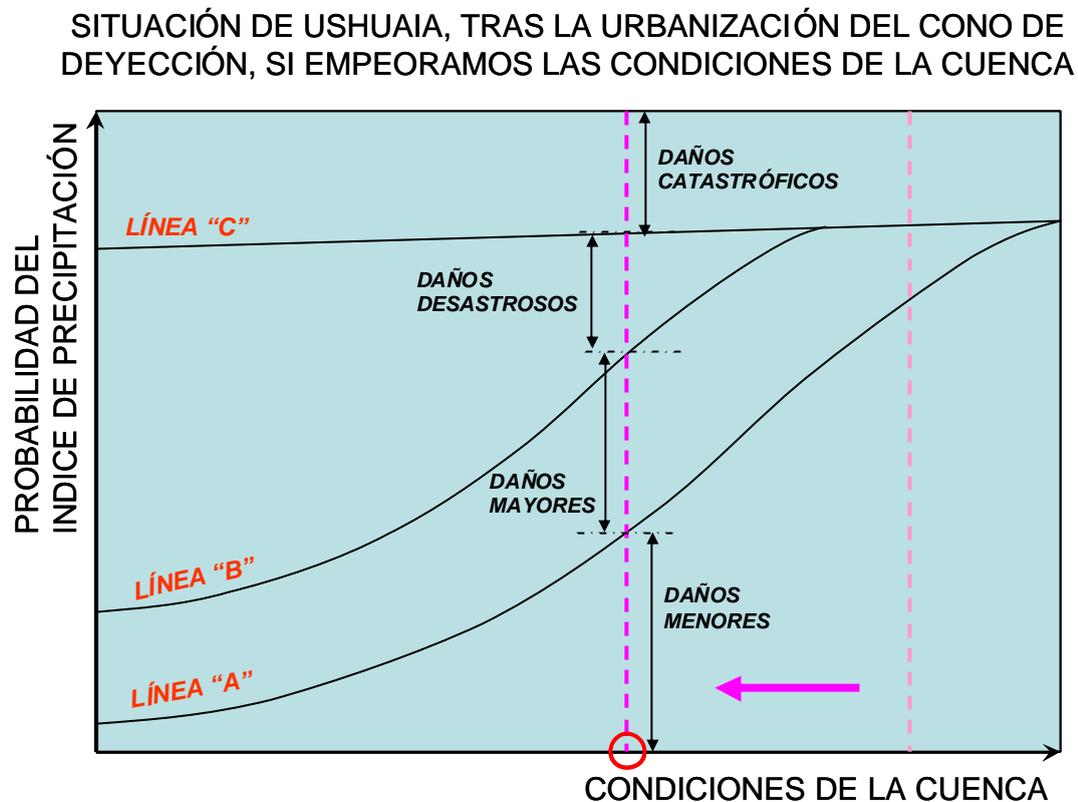


Figura 4.6. Situación previsible de la cuenca vertiente del arroyo de Buena Esperanza. Los daños esperables en la ciudad de Ushuaia se incrementan respecto a la situación actual, para un mismo régimen geo-torrencial, porque la ciudad en su expansión invade áreas del actual bosque natural de *Nothofagus*, reduciendo con ello el grado de protección de la cuenca vertiente ante la ocurrencia en ella de eventos torrenciales extraordinarios.

La cuestión se centra en valorar lo que se denominan: 1) *daños menores*, 2) *daños mayores*, 3) *desastres* y 4) *catástrofes*, dentro de la situación actual del área ocupada por el desarrollo de la población de Ushuaia.

Pero para responder a la cuestión planteada en el párrafo anterior y materializar el análisis económico del efecto protector del bosque de *Nothofagus*, situado al final del área dominante de la cuenca vertiente al arroyo de Buena Esperanza, en el control del geo-dinamismo torrencial de dicho arroyo (especialmente en su recorrido por el área dominada), cuando en la cuenca suceden eventos torrenciales (precipitaciones extraordinarias o fusiones repentinas del manto de nieve), se deben elaborar dos elementos para su análisis. Son los siguientes:

1. Una tabla que resuma con suficiente detalle las características de la corriente en el arroyo de Buena Esperanza y el estado físico de su cuenca vertiente, con la superficie de bosque natural de *Nothofagus* actual, para poder interpretar la respuesta que pueden

- experimentar ambos (corriente del arroyo y cuenca vertiente) ante el geo-dinamismo torrencial, dependiendo del tipo de evento torrencial que suceda en la cuenca vertiente.
2. Una simulación de las situaciones que se pueden generar en la cuenca del arroyo de Buena Esperanza, en relación con los eventos torrenciales adoptados para el análisis.

La Tabla 4.2 responde al primero de los elementos; en concreto en sus cuatro primeras columnas se muestran las características físicas del arroyo y de su cuenca vertiente. En cuanto al segundo, se opta por simplificar el esquema adoptado por **Sarandón, Gaviño Novillo y Guerrero Borges** y utilizar, además de la *situación normal*, las correspondientes a eventos torrenciales ordinarios (*daños menores*), eventos torrenciales extraordinarios (*daños mayores*) y eventos torrenciales extremos (*desastres o catástrofes*). En las tres últimas columnas de la Tabla 4.2 se trata de dar una visión de cómo podría ser el comportamiento de la cuenca y del propio arroyo de Buena Esperanza para la *situación normal*, para la de los *daños menores* y para la *situación de desastre*.

A continuación, se trata de dar una visión preliminar que sirva de orientación de cómo se podrían definir las cuatro situaciones planteadas: 1) *normal*, 2) de *daños menores*, 3) de *daños mayores* y 4) de *desastre o catástrofe*.

1. Situaciones normales: en los que no se consideran daños en la cuenca.
2. Situaciones de eventos torrenciales ordinarios (precipitaciones torrenciales ordinarias o pequeñas crecidas por fusión del manto de nieve). Su periodo de retorno se podría estimar en 10 años. En esta situación sus efectos se pueden definir como *daños menores* (ejemplo, deterioros en los caminos de tierra de la cuenca, que requieren reparaciones; aterramiento en el sistema de captación de agua de la ciudad, que necesita de limpieza; pequeñas zonas inundadas o anegadas en las áreas dominadas, que requieren de limpieza y posiblemente reparación, etc.).
3. Situaciones de eventos torrenciales extraordinarios (precipitaciones torrenciales extraordinarias o crecidas importantes por fusión del manto de nieve). Su periodo de retorno se podría estimar en 25 años. En esta situación sus efectos se pueden definir como *daños mayores* (ejemplo, deterioros importantes en los caminos de tierra de la cuenca y deterioros observables en los caminos asfaltados, que requieren reparaciones; aterramiento en el sistema de captación de agua para la ciudad y taponamientos en los sistemas de drenaje, que necesitan de limpieza y reparaciones; zonas importantes inundadas y aterradas en las áreas dominadas, que requieren de limpieza y reparaciones importantes, etc.)
4. Situaciones de eventos torrenciales extremos con resultados desastrosos o catástrofes. Su periodo de retorno se podría estimar en 50 o más años. En este caso los efectos serían graves y los daños afectarían a toda la cuenca, definiéndose la situación de *desastre o catástrofe*. Los daños en el área dominada, además de todos los comentados para la situación anterior de *daños mayores*, aumentados y agravados, afectarían a amplias superficies a ambos márgenes del arroyo en todo su cono de sedimentación y canal de desagüe, con obstrucción de numerosas secciones del mismo (abiertas y cerradas) e importantes áreas anegadas y aterradas. Además en las áreas dominadas tendría lugar deslizamientos superficiales, regueros y erosiones del suelo de todo tipo en las superficies no protegidas por el arbolado o por las turberas.

Hay que suponer que de no existir el bosque, los efectos geo-torrenciales en la cuenca de recepción serían semejantes a que los que se han consignado en la Tabla 4.2 para la cubierta de hierba o para el suelo desnudo y, en consecuencia, contribuirían a una mayor descarga de

sedimentos y mayores daños por causa de los aterramientos provocados por ellos en cada situación, con eventos ordinarios y con los extraordinarios

A partir de esta situación, el análisis económico puede optar por dos orientaciones: La *primera* de ellas se trata de un análisis de *Beneficios/Costos* e implica las operaciones siguientes:

- Se valoran los beneficios que se obtienen, por los daños que se evitan (valorados por los costes de reparación de los mismos), como consecuencia del grado de protección que dispone la cuenca del arroyo de Buena Esperanza ante el geo-dinamismo torrencial por la presencia en ella del bosque de *Nothofagus*.

Estos beneficios se producen a lo largo del tiempo, dependiendo de la ocurrencia de los eventos torrenciales, luego es necesario aplicar un análisis temporal, para trasladar todos los beneficios al año de partida.

- Se estima la inversión que supone el bosque de *Nothofagus* en su estado actual. Se podría plantearse como el costo de una repoblación desde que se realiza la plantación hasta que se consolida, incluyendo los gastos complementarios para garantizar la consolidación.

En este caso existe una inversión importante inicial, las operaciones de repoblación, y varias inversiones menores hasta la consolidación de la masa arbolada; por lo que también se debe plantear un análisis temporal, para trasladar todos los beneficios al año de partida.

- Finalmente conocidos los Beneficios reportados: B y la inversión que supone el bosque *Nothofagus* de la cuenca: C, se plantea el rendimiento como el cociente B/C.

La *segunda* orientación es más sencilla y define mejor la incidencia del bosque de *Nothofagus* ubicado en la cuenca vertiente del arroyo de Buena Esperanza, en la protección de ésta ante el geo-dinamismo torrencial. Consiste en estimar el capital del bosque como infraestructura de protección a la ciudad de Ushuaia, a partir de los beneficios que reporta el mismo a la cuenca, al reducir los efectos del geo-dinamismo torrencial en cada uno de los eventos torrenciales que tengan lugar en la misma, lo que se valora en función de los daños que se evitan y se cuantifica atendiendo al coste de reparación de los daños en cuestión. También en este caso hay que plantearse un análisis temporal para establecer los beneficios, que serán mayores cuanto este sea más amplio y pueda incluir en él un evento tipificado como desastre o catástrofe; por tanto, cuanto mayor es el periodo contemplado en el análisis, el capital del bosque de *Nothofagus* como protector de la ciudad de Ushuaia es mayor, lo que se acrecienta si además se tiene en cuenta que los gastos de mantenimiento del bosque en cuestión son prácticamente inexistentes.

Por último, comentar que en la situación actual, la único elemento protector ante el geo-dinamismo torrencial que dispone la cuenca del arroyo de Buena Esperanza es su bosque de *Nothofagus*, por lo que todo el análisis ha girado en torno al mismo; pero si en el futuro se realiza alguna otra medida de restauración hidrológico-forestal, ésta debería ser considerada en el análisis.

A continuación se adjunta la Tabla 4.2, para cuya interpretación se realizan las aclaraciones siguientes:

- a) El área de recepción (que incluye la mayor parte de la superficie de la cuenca, desde su propia divisoria al norte hasta aproximadamente la cota de los 200 m s n m.)
- b) La garganta (que se extiende entre los 200 y los 100 m de cota s. n. m.)
- c) El cono de sedimentación (sobre el que se asienta el área de expansión de la ciudad por el oeste) y
- d) Finalmente, un pequeño canal de desagüe que se corresponde con el último tramo del arroyo antes de su desembocadura en la Bahía Encerrada. Evidentemente el arroyo está encauzado en sus tres tramos inferiores; pero ello no supone una garantía intrínseca para su normal funcionamiento en caso de una avenida torrencial extraordinaria.

Superficie afectada en la cuenca	Características del flujo en el arroyo de Buena Esperanza y estado físico de su cuenca vertiente con la superficie actual del bosque natural de <i>Nothofagus</i>		Efectos hidrológicos y geo-torrencales dependiendo del tipo de evento torrencial			
			En situaciones normales	Para eventos torrencales o de fusión del manto de nieve ordinarios	Para eventos torrencales o de fusión del manto de nieve extraordinarios o extremos	
Área de recepción	En el cauce del arroyo	Caudales líquidos	Caudal estable con un módulo de 300 l s ⁻¹	Incremento del volumen de escorrentía directa (Q, m ³) y del caudal punta (q _p , m ³ s ⁻¹) en el arroyo, con ensanchamiento de la sección de inundación	Máximos valores para el volumen de escorrentía directa (Q, m ³) y el caudal punta (q _p , m ³ s ⁻¹) del arroyo, con amplio ensanchamiento de la sección de inundación	
		Caudales sólidos	En suspensión	Presenta turbidez durante los deshielos	Incremento de la sección de inundación del arroyo por la crecida del flujo y aumento de la turbidez durante los eventos torrencales o de fusión del manto de nieve	Incremento de la sección de inundación del arroyo por la crecida del flujo y aumento de la turbidez, hasta poner en movimiento sedimentos que en situaciones normales son transportados por arrastre
			Descarga de fondo	No apreciable o poco importante, a pesar de que exista una gran cantidad de material suelto sobre el lecho del arroyo	Incremento del radio hidráulico y erosión por abrasión en el cauce del arroyo por la crecida del flujo, con aumento del transporte de fondo. Aguas abajo se pueden generar problemas por arrastre del material del lecho.	Incremento del radio hidráulico y fuerte erosión por abrasión en el cauce del arroyo por la crecida del flujo con aumento del transporte de fondo. Aguas abajo se pueden generar problemas graves por arrastre del material del lecho. La abundancia de árboles secos en el cauce del arroyo puede contribuir a incrementar el efecto torrencial de estos eventos.
	En las laderas de la cuenca vertiente	Cubiertas por el bosque natural de <i>Nothofagus</i>	Las laderas se mantienen estables	Lo previsible es que las laderas continúen estables	Lo previsible es que las laderas sigan manteniéndose estables	
		Vegetación herbácea (en cotas superiores a los 600 m)	Las laderas se mantienen estables, con algunos regueros aislados.	Previsible aparición de regueros e incluso algún deslizamiento superficial aislado; aunque de escasa magnitud	Lo previsible es la aparición múltiples regueros y deslizamientos superficiales.	

Tabla 4.2. Características del flujo en el arroyo de Buena Esperanza y del estado físico de su cuenca vertiente, con la superficie actual del bosque natural de *Nothofagus*, respecto a su capacidad para experimentar fenómenos geo-torrencales según el tipo de evento.

Superficie afectada en la cuenca	Características del flujo en el arroyo de Buena Esperanza y estado físico de su cuenca vertiente con la superficie actual del bosque natural de <i>Nothofagus</i>		Efectos hidrológicos y geo-torrencales dependiendo del tipo de evento torrencial		
			En situaciones normales	Para eventos torrencales o de fusión del manto de nieve ordinarios	Para eventos torrencales o de fusión del manto de nieve extraordinarios o extremos
Área de recepción	En las laderas de la cuenca vertiente	Sin vegetación (en las cotas más elevadas de la cuenca)	Erosión superficial y en regueros en las cotas más altas, sin efectos aguas abajo.	Incremento de la erosión superficial y regueros. Algunos deslizamientos superficiales.	Fuerte incremento de la erosión de todo tipo, superficial, regueros y barranqueras. Deslizamientos superficiales.
		En las turberas	Se mantienen estables	Lo previsible es que se mantengan como están	Lo previsible es que se mantengan como están
		En las morrenas	Se mantienen estables	Lo previsible es que se mantengan como están	Es difícil de prever, pero se pueden mantener como están
		En las obras situadas en el entorno del arroyo (con o sin autorización).	Se mantienen con reparaciones periódicas.	Lo previsible es que se destruyan todas las pequeñas obras existentes: de toma de agua, de vertido, pasarelas y el resto de las mismas.	Las obras próximas al arroyo quedarán destruidas. La abundancia de árboles secos en el cauce del arroyo puede contribuir a incrementar el efecto torrencial de estos eventos
	En las infra-estructuras	Caminos	Los asfaltados se mantienen. Los de tierra necesitan reparaciones frecuentes	Los asfaltados podrían requerir alguna reparación Los de tierra necesitarán serias reparaciones tras el evento torrencial	Todos los caminos requerirán de alguna reparación tras el evento torrencial, especialmente los de tierra.
		Pistas de esquí	Se mantienen, pero aparecen regueros que corregir tras el periodo invernal. Lo que es habitual en todas las pistas.	Depende si el evento ocurre con la pista con nieve o sin nieve. En el segundo caso pueden aparecer fuertes erosiones superficiales y regueros profundos que necesiten de una corrección inmediata.	Depende de si el evento ocurre con la pista con nieve o sin nieve. En el segundo caso pueden aparecer fuertes erosiones superficiales y regueros profundos que necesiten de una corrección inmediata.
	En el paisaje	A gran distancia Panorámica de Ushuaia	Bello y sublime a la vez (clasificación de Kant)	Bello y sublime a la vez (clasificación atribuida a Kant)	Bello y sublime a la vez (clasificación atribuida a Kant)
A corta distancia		Es bello.	Alterado por el evento	Alterado y localmente devastado.	

Tabla 4.2. (Continuación 1) Características del flujo en el arroyo de Buena Esperanza y del estado físico de su cuenca vertiente, con la superficie actual del bosque natural de *Nothofagus*, respecto a su capacidad para experimentar fenómenos geo-torrencales según el tipo de evento.

Superficie afectada en la cuenca	Características del flujo en el arroyo de Buena Esperanza y estado físico de su cuenca vertiente con la superficie actual del bosque natural de <i>Nothofagus</i>		Efectos hidrológicos y geo-torrencales dependiendo del tipo de evento torrencial			
			En situaciones normales	Para eventos torrencales o de fusión del manto de nieve ordinarios	Para eventos torrencales o de fusión del manto de nieve extraordinarios o extremos	
Garganta	En el cauce del arroyo	Caudales líquidos	Caudal estable con un módulo de 300 l s^{-1}	Incremento del volumen de escorrentía directa ($Q, \text{ m}^3$) y del caudal punta ($q_p, \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) en el arroyo, con ensanchamiento de la sección de inundación.	Máximos valores para el volumen de escorrentía directa ($Q, \text{ m}^3$) y el caudal punta ($q_p, \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) del arroyo, con amplio ensanchamiento de la sección de inundación.	
		Caudales sólidos	En suspensión	Presenta turbidez durante los deshielos	Incremento de la sección de inundación del arroyo por la crecida del flujo y aumento de la turbidez durante los eventos torrencales o de fusión del manto de nieve	Incremento de la sección de inundación en el cauce del arroyo por la crecida del flujo y aumento de la turbidez, hasta poner en movimiento sedimentos que en situaciones normales son transportados por arrastre
			Descarga de fondo	No apreciable o poco importante, a pesar de que exista una gran cantidad de material suelto sobre el lecho del arroyo	Incremento del radio hidráulico y erosión por abrasión en el cauce del arroyo por la crecida del flujo, con fuerte aumento del transporte de fondo. Los acarreo pueden aterrizar por completo en una sola avenida el depósito de toma de agua de la ciudad.	Fuerte incremento del radio hidráulico y de la erosión por abrasión en el cauce del arroyo por la crecida del flujo, con fuerte aumento del transporte de fondo. Aterramiento por completo del depósito de toma de agua de la ciudad. La abundancia de árboles secos en el cauce del arroyo puede contribuir a incrementar el efecto torrencial.
	Vertientes directas al arroyo	En las infraestructuras próximas al arroyo	Se mantienen con reparaciones periódicas.	Lo previsible es que la crecida del cauce los aterre; pudiendo incluso destruirlas.	Lo previsible es que la crecida del cauce los aterre y los destruya, sobre todo las instalaciones sin protección.	
		Caminos	Los asfaltados se mantienen. Los de tierra necesitan reparaciones frecuentes	Los asfaltados podrían requerir alguna reparación Los de tierra necesitarán serias reparaciones tras el evento torrencial	Todos los caminos requerirán de alguna reparación tras el evento torrencial, especialmente los de tierra.	
	En el paisaje	A corta distancia	Es bello.	Alterado por el evento	Alterado y localmente devastado.	

Tabla 4.2. (Continuación 2) Características del flujo en el arroyo de Buena Esperanza y del estado físico de su cuenca vertiente, con la superficie actual del bosque natural de *Nothofagus*, respecto a su capacidad para experimentar fenómenos geo-torrencales según el tipo de evento.

Superficie afectada en la cuenca	Características del flujo en el arroyo de Buena Esperanza y estado físico de su cuenca vertiente con la superficie actual del bosque natural de <i>Nothofagus</i>		Efectos hidrológicos y geo-torrencales dependiendo del tipo de evento torrencial			
			En situaciones normales	Para eventos torrencales o de fusión del manto de nieve ordinarios	Para eventos torrencales o de fusión del manto de nieve extraordinarios o extremos	
Cono de sedimentación	En el cauce del arroyo	Caudales líquidos		Caudal estable con un módulo de 300 l s^{-1}	Incremento del volumen de escorrentía directa ($Q, \text{ m}^3$) y del caudal punta ($q_p, \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) en el arroyo, con ensanchamiento de la sección de inundación.	Máximos valores para el volumen de escorrentía directa ($Q, \text{ m}^3$) y del caudal punta ($q_p, \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) del arroyo, con ensanchamiento de la sección de inundación.
		Caudales sólidos	En suspensión	Presenta turbidez durante los deshielos	Incremento de la sección de inundación del arroyo por la crecida del flujo y aumento de la turbidez durante los eventos torrencales o de fusión del manto de nieve	Incremento de la sección de inundación del arroyo por la crecida del flujo y la turbidez, podría aumentar hasta poner en movimiento sedimentos que en situaciones normales son transportados por arrastre
			Descarga de fondo	Es reducido y apenas perceptible de visu. (Si el arroyo no estuviera encauzado sería una zona de depósito, circunstancia que en las condiciones actuales se reduce a los momentos de avenidas).	El cono está encauzado por lo que se incrementará el radio hidráulico y erosionará el cauce durante la crecida del flujo con posible aumento del transporte de fondo. La corriente con su descarga de sedimentos podrá llenar la sección del canal y desbordar por ambos lados o por donde le favorezca la topografía. Al inicio del cono la pendiente del canal es alta, lo que favorece la evacuación del flujo, pero si viene muy cargado de sedimentos, comenzará por depositarlos, contribuyendo con ello a que el flujo desborde.	El cono está encauzado por lo que se incrementará el radio hidráulico y erosionará el cauce durante la crecida del flujo, con posible aumento del transporte de fondo. La corriente con los sedimentos llenará por completo la sección del canal y, aunque éste presenta en su inicio bastante pendiente, será insuficiente para impedir que se inicie el depósito de los sedimentos en el mismo y a desbordarse la corriente por ambos lados o por donde le favorezca la topografía del terreno La abundancia de árboles secos en el cauce del arroyo puede contribuir a incrementar el efecto torrencial de estos eventos

Tabla 4.2. (Continuación 3) Características del flujo en el arroyo de Buena Esperanza y del estado físico de su cuenca vertiente, con la superficie actual del bosque natural de *Nothofagus*, respecto a su capacidad para experimentar fenómenos geo-torrencales según el tipo de evento.

Superficie afectada en la cuenca	Características del flujo en el arroyo de Buena Esperanza y estado físico de su cuenca vertiente con la superficie actual del bosque natural de <i>Nothofagus</i>		Efectos hidrológicos y geo-torrencales dependiendo del tipo de evento torrencial		
			En situaciones normales	Para eventos torrencales o de fusión del manto de nieve ordinarios	Para eventos torrencales o de fusión del manto de nieve extraordinarios o extremos
Cono de sedimentación	Vertientes directas al arroyo	En las infraestructuras próximas al arroyo, calles y caminos	Se mantienen con las reparaciones periódicas	Pueden inundarse, sobre todo si el flujo viene muy cargado de sedimentos.	Serán inundados, al llegar la corriente muy cargada de sedimentos. Éstos últimos incrementan el efecto de la inundación y causan daños importantes.
	En el paisaje	Corta y media distancia	Es normal	Alterado por el evento	Alterado y puede llegar a devastado.
Canal de desagüe	En el cauce del arroyo.	Caudales líquidos	Caudal estable con un módulo de 300 l s^{-1}	Incremento del volumen de escorrentía directa ($Q, \text{ m}^3$) y del caudal punta ($q_p, \text{ m}^3, \text{ s}^{-1}$) en el arroyo, con ensanchamiento de la sección de inundación.	Máximos valores para el volumen de escorrentía directa ($Q, \text{ m}^3$) y el caudal punta ($q_p, \text{ m}^3, \text{ s}^{-1}$) del arroyo, con ensanchamiento de la sección de inundación.
		Caudales sólidos	En suspensión	Presenta turbidez durante los deshielos, aunque en esta área se produce también la decantación de los sedimentos que transporta la corriente.	Aunque el flujo presente una turbidez elevada, en esta área se produce también la decantación de los sedimentos transportados por la corriente.
			Descarga de fondo	No hay, se trata de una zona de depósito de sedimentos	Al encontrarse el cono de deyección encauzado, el tramo en cuestión funciona en parte como una prolongación del mismo; por lo que es previsible que el arroyo aumente su sección mojada, inunde temporalmente el área en cuestión y deposite en ella los últimos arrastres que pudiera transportar la corriente

Tabla 4.2. (Continuación 4) Características del flujo en el arroyo de Buena Esperanza y del estado físico de su cuenca vertiente, con la superficie actual del bosque natural de *Nothofagus*, respecto a su capacidad para experimentar fenómenos geo-torrencales según el tipo de evento.

Superficie afectada en la cuenca	Características del flujo en el arroyo de Buena Esperanza y estado físico de su cuenca vertiente con la superficie actual del bosque natural de <i>Nothofagus</i>		Efectos hidrológicos y geo-torrencales dependiendo del tipo de evento torrencial		
			En situaciones normales	Para eventos torrencales o de fusión del manto de nieve ordinarios	Para eventos torrencales o de fusión del manto de nieve extraordinarios o extremos
Canal de desagüe	Vertientes directas al arroyo	Áreas situadas a ambos márgenes del arroyo, que en este paraje discurre encauzado, salvo en el tramo que pasa por debajo de la autopista en el que se encuentra entubado.	Las conducciones que se disponen resultan adecuadas y suficientes para la circulación de la corriente en situaciones normales.	Es previsible que el arroyo aumente su sección mojada e inunde temporalmente el área en cuestión; pero lo normal es que las conducciones que se disponen para evacuar el flujo resultan adecuadas y suficientes o al menos no prolonguen mucho la evacuación. En un proceso normal el flujo recorrería este tramo libre de sedimentos tras descargarlos en el cono de deyección; pero al estar éste encauzado, se impide al arroyo que divague por él y convierte funcionalmente a este tramo en la continuación cono, por lo que los sedimentos incluso los arrastres pueden ser transportados hasta el mismo.	Lo previsible es que el arroyo aumente ampliamente su sección mojada e inunde temporalmente el área en cuestión. Esta posibilidad debe estar contemplada. En un proceso normal el flujo recorrería este tramo libre de sedimentos tras descargarlos en el cono de deyección; pero al estar éste encauzado, se impide al arroyo que divague por él y convierte funcionalmente a este tramo en la continuación cono, por lo que los sedimentos incluso los arrastres pueden ser transportados hasta el mismo. Se puede producir en el momento de máxima avenida, que la conducción final del arroyo, que es cerrada, entre en carga.; produciendo graves pérdidas en infraestructuras.
	En el paisaje	A gran distancia Panorámica de Ushuaia	Bello y sublime a la vez (clasificación atribuida a Kant)	Bello y sublime a la vez (clasificación atribuida a Kant)	Bello y sublime a la vez (clasificación atribuida a Kant)
		A corta distancia	Se debe urbanizar bien, para realzar la panorámica de Ushuaia y mejorar la circulación de la corriente.	Se puede alterar por el evento.	Se puede alterar e incluso devastar en alguna zona concreta por el evento, pero si se controlan las fuentes de emisión de sedimentos, que están en las montañas, la devastación será menor.

Tabla 4.2. (Continuación 5) Características del flujo en el arroyo de Buena Esperanza y del estado físico de su cuenca vertiente, con la superficie actual del bosque natural de *Nothofagus*, respecto a su capacidad para experimentar fenómenos geo-torrencales según el tipo de evento.

4.2. ANÁLISIS DE LOS BENEFICIOS QUE REPORTA LA ORDENACIÓN AGRO-HIDROLÓGICA DE UNA CUENCA VERTIENTE EN RELACIÓN CON SU DESARROLLO SUSTENTABLE

En este apartado se resume el esquema de la *metodología* de **Aguiló** (1976), para estimar los beneficios que aporta a una cuenca vertiente su ordenación agro-hidrológica. La filosofía de la *metodología* en cuestión se fundamenta en la siguiente hipótesis: si las áreas dominantes de una cuenca vertiente se encuentran estabilizadas, bien mediante un bosque natural o de repoblación, o bien con estructuras de sistematización del terreno, los eventos torrenciales que incidan en ellas se podrán amortiguar mejor que si no lo están y, sobre todo, que si se encuentran degradadas.

Ante esta situación, tanto la escorrentía directa como a la erosión del suelo en las áreas dominantes será menor, lo que condicionará a que la escorrentía transmitida aguas abajo hacia las áreas dominadas llegue con menor energía para erosionar el suelo y menor carga de sedimentos para atarcarlo; evitándose así daños en las áreas de cultivo. Estos beneficios se pueden valorar porque implican: *a)* menores costes de preparación del suelo para las cosechas, *b)* un mejor aprovechamiento del agua, porque al circular con menor velocidad se favorece la infiltración y *c)* menores daños ante eventos torrenciales ordinarios, porque la capacidad geo-torrenciales del evento se consigue amortiguar en las áreas más vulnerables y de mayor altitud, lo que repercute a toda la cuenca. Dicho de otro modo, las áreas de cultivo y sus cosechas, situadas en las zonas dominadas, estarán mejor defendidas de los efectos geo-torrenciales generados aguas arriba.

En síntesis la *metodología* de **Aguiló** (1976) se basa en los principios siguientes:

1. *Suponer que los efectos que sobre el suelo se consiguen con las inversiones (se refiere a las inversiones de corrección de cuencas, que se realizan sobre todo en sus áreas dominantes), equivalen a realizar unos gastos anuales para conseguir dichos efectos (se refiere a los gastos que se emplearían en el mantenimiento de los suelos en la cuenca, en el supuesto que éstos no estuvieran protegidos por las obras de corrección).*
2. *La suma de estos gastos anuales, considerada como cuota de interés de las inversiones, nos dan el rendimiento de las mismas.*

Las distintas orientaciones de la conservación de suelos, tanto en los aspectos productivos del terreno, como en los daños que a los mismos se pretenden evitar y las mejoras que se desean conseguir, dan lugar a que en cada caso deban considerarse los diversos factores que intervienen en ellos. Esquemáticamente éstos son los siguientes:

1. Correspondientes a beneficios que se producen o daños que se evitan en el propio suelo en el que se realizan obras y trabajos:
 - a) Cuota de conservación del capital suelo.
 - b) Cuota de seguro de daños en el suelo (riesgo por daños directos de las precipitaciones, para un periodo de retorno de 10 años, no catastrófico).
 - c) Canon de disponibilidad de agua por aumento de la infiltración.
 - d) Canon de disponibilidad de agua por almacenamiento superficial.
2. Correspondiente a daños que se evitan por afluencia de aguas, que normalmente proceden de zonas dominantes en las áreas dominadas:

- e) Cuota de seguro de daños de arrastre de suelo causados por avenidas, para un periodo de retorno de 10 años, no catastrófico.
- f) Cuota de seguro por destrucción de cultivos, tanto por arrastre, como por anegamiento prolongado.

Al considerar los apartados e) y f) no pueden utilizarse conjuntamente con ellos ninguno de los apartados b) y c); y, al considerar el caso f) por anegamiento, no se podrá utilizar a la vez el c).

La *metodología* continúa analizando con detalle cada uno de dichos efectos y la forma de evaluarlos, que es lo que en cada área geográfica concreta se debe replantear y para lo que se necesita una investigación previa o al menos un buen conocimiento agronómico de lo que sucede en el área en cuestión; lo óptimo es disponer de ambos.

A continuación se determinan los beneficios totales como suma de los beneficios obtenidos por cada uno de los aspectos concretos que se han considerado anteriormente durante el tiempo de consolidación del proyecto, a los que se restan los gastos de manteniendo en el mismo periodo y todo ello se traslada al año uno, en el que se realizan las inversiones de restauración agro-hidrológica de la cuenca, para posteriormente aplicar el análisis económico de Beneficio/Costes (B/C) o bien la Tasa Interna de Rendimiento (TIR).

Esta *metodología*, aunque parezca sencilla, implica un buen conocimiento de la cuenca en cuestión en un doble sentido:

1. Una definición lo más precisa posible del estado físico de la cuenca en relación con los factores que intervienen en los procesos hidrológicos, de conservación de suelos y de los fenómenos del geo-dinamismo torrencial que incidan en la misma.
2. Una previsión de su comportamiento hidrológico y de conservación de suelos ante todo tipo de eventos torrenciales ordinarios. La *metodología* como tal descarta los eventos extremos por imprevisibles en cuanto a sus efectos, admitiendo la máxima que a *los casos extraordinarios hay que tratarles como tales*

En su versión más sencilla, la metodología considera tres efectos beneficiosos causados por la restauración de la cuenca en la que se aplica. Son los siguientes:

1. Beneficios de conservación del suelo o de los daños que se evitan en el mismo por efecto de las obras y trabajos efectuados en la cuenca en el proceso de su restauración, a lo que el autor denomina *tasa de conservación de suelos*.
2. Renta de la inversión en conservación de suelos, procedente de las obras y trabajos de la restauración de la cuenca, que se puede considerar como la cuota de seguro que se debería pagar por evitar o compensar los daños posibles en el periodo de cálculo (que el autor estima en diez años, porque suponer un periodo mayor aumentaría de forma gravosa el coste de las inversiones) y que denomina *cuota por riesgo de daños en el suelo*. Esta renta es decenal, por lo que es preciso convertirlo en anual, para ser comparable a la de los otros dos beneficios que se derivan de la restauración de la cuenca y ello implica adoptar un tipo de interés para su cálculo.

3. El *incremento de agua infiltrada en el suelo*, como consecuencia de la restauración de la cuenca. Cuando la restauración implica únicamente trabajos de sistematización del terreno en la cuenca, siguiendo curvas de nivel para regular la escorrentía directa e incrementar con ello la infiltración, parece que no hay problemas en ninguna latitud del mundo para aceptarlo. Pero si las medidas adoptadas en la restauración incluyen la repoblación forestal, en determinadas latitudes y ante determinadas ocupaciones del suelo en las áreas dominantes, habría que plantearse el costo en consumo de agua que necesitará dicha repoblación en los primeros 15-20 años desde su implantación. A esto hay que añadir, que en la práctica se demuestra que las medidas de sistematización del terreno, cuando éste supera determinadas pendientes, no resultan estables por razones de mecánica de suelos para asegurar el mantenimiento de las mismas, siendo conveniente la presencia del arbolado aguas arriba de ellas. Por otro lado, en la Europa meridional la mayoría de los suelos forestales tienen un perfil edáfico muy reducido y el arbolado mejora su permeabilidad; pero en las cuencas de América Latina este beneficio *agua infiltrada en el suelo* hay que estudiarlo detenidamente en cada situación.

Antes de presentar los criterios cuantitativos, establecidos en la *metodología*, para estimar cada uno de los tres beneficios que aporta a la cuenca su restauración hidrológico-forestal, se muestra en tres tablas el contenido y desarrollo de la misma. Éstas representan:

1. Tabla 4.3 ***Inversiones totales*** en una cuenca vertiente, en la que se ha realizado una restauración hidrológico-forestal, que es objeto de su análisis económico.
2. Tabla 4.4 ***Beneficios unitarios suelo-agua*** atribuidos a la restauración hidrológico-forestal en una cuenca objeto de su análisis económico.
3. Tabla 4.5 ***Rentabilidades e iteraciones*** en una cuenca vertiente en la que se ha realizado su restauración hidrológico-forestal, objeto de su análisis económico.

La aplicación de la Tabla 4.3 implica una valoración del precio de la tierra tanto en lo que se refiere a la *tasa de conservación del suelo* (columna 5), como en relación con los daños que pueda sufrir como consecuencia de los eventos torrenciales decenales que incidan en ella, lo que se ha definido como *cuota por riesgo de daños en el suelo* (columna 8). El método establece que para el primer caso, se debe eliminar de los precios de las transacciones de compraventa todo valor que no afecte directamente al suelo, a fin de aplicar la cuota de conservación al auténtico valor del suelo como tal; en cuanto al segundo caso, debe referirse al % del valor del suelo que representan las pérdidas.

Orientación	Procedencia	Pendientes (%)	Superficie (ha)	Inversiones		
				Actuales	Anteriores	Totales
Arbolado	Arbolado	> 30				
	Matorral					
	Pastos degradados					
Pastos	Pastos	< 30				
	Cultivos abandonados					
Cultivos	Cultivos	< 12				
Regadíos	Cultivos					
Improductivo		Cualquiera				

Tabla 4.3 ***Inversiones totales*** en una cuenca vertiente, en la que se ha realizado una restauración hidrológico-forestal, que es objeto de su análisis económico.

Orientación	Procedencia	Conservación				Daños en el suelo				Mejora de la infiltración				Cuota anual	Beneficios	
		Pendiente	i (%)	Base	Cuota	(%)	Base	Cuota decenal	Cuota anual	i (%)	P (mm.)	m ³ ha ⁻¹	Cuota		Anuales	Decenales
Arbolado	Arbolado															
	Matorral															
	Pastos degradados															
Pastos	Pastos															
	Cultivos abandonados															
Cultivos	Cultivos															
Regadíos	Cultivos															
Improductivo																

Tabla 4.4 **Beneficios unitarios suelo-agua** atribuidos a la ordenación agro-hidrológica en una cuenca objeto de su análisis económico

Orientación	Destino	Procedencia	Pendientes (%)	Superficie (ha)	Inversión Total	Beneficios		Rentabilidad (%)	Iteraciones (%)
						Unitarios	Totales		
Arbolado	Arbolado	Arbolado	> 30						
	Vegetación climática: Bosques; Páramos; Praderas, etc.	Vegetación natural climática degradada por su utilización.							
	Pastizales conservados(*)	Pastos degradados							
Pastos	Pastizales conservados	Pastos	< 30						
		Cultivos abandonados							
Cultivos		Cultivos	< 12						
Regadíos		Cultivos							
Improductivo									

(*) En situaciones de pendientes más moderadas dentro del rango de mayores al 30 % y con medidas de protección convenientes.

Tabla 4.5 **Rentabilidades e iteraciones** en una cuenca vertiente en la que se ha realizado su ordenación agro-hidrológica, objeto de su análisis económico

En la Tabla 4.5, dividiendo la suma de todas las filas de la columna 8 (Beneficios totales) por la suma de todas las filas de la columna 6 (Inversión total), se obtiene la rentabilidad media de restauración agro-hidrológica de la cuenca por el criterio de Beneficios/ Costos.

En la columna 9 de la misma Tabla 4.5 se reflejan las rentabilidades por orientaciones, que serán reducidas en las áreas dominantes, donde se realizan las mayores inversiones, e irán elevándose conforme se desciende a las áreas dominadas, donde tienen lugar menores inversiones pero se benefician de las realizadas en las áreas dominantes. En la última columna de la tabla en cuestión se reflejan las iteraciones; es decir las diferencias entre la rentabilidad media en el conjunto de la cuenca vertiente y la rentabilidad obtenida para cada una de las orientaciones. En las áreas dominantes las iteraciones resultan positivas, mientras que en las dominadas toman valores negativos, lo que se interpreta como que las inversiones realizadas en las primeras, aportan beneficios en las segundas.

Finalmente se adjuntan las tablas que presentan los criterios de valoración de los tres tipos de beneficios que la ordenación agro-hidrológica aporta a la cuenca en la metodología de **Aguiló**.

Tipo de terreno o aprovechamiento	Tasa de conservación (%)
Terrenos incultos con vocación arbolada o de pastizal, o de cultivos arbóreos en pendiente superior al 10 %.	3,0
Terrenos cultivados con aprovechamiento herbáceo o arbóreo con pendientes superiores al 10 %	2,0
Terrenos cultivados con pendientes inferiores al 10 %, pero sin sistematización especial	1,0
a) Terrenos cultivados con pendientes inferiores al 1 % o nivelados, o b) Terrenos de cualquier pendiente, sin obras de defensa, repoblados totalmente o con el pasto establecido permanentemente	0,5

Tabla 4.6. Tasa de conservación de suelos.

Pendiente	Precipitaciones máximas en 24 horas (periodo de retorno de 10 años) mm					
	20	40	60	80	100	120
< 10 %	0	2,5	5	8	11	16
10-25 %	1	4	7	10	14	20
> 25 %	2	5,5	9	12	17	24

Tabla 4.7. Cuota por riesgo de daños en el suelo.

Precipitaciones máximas en 24 horas, mm (periodo de retorno de 10 años)	Aumento del agua infiltrada en % de lluvia anual		
	Agrícola	Forestal (arbolado)	Pastizal
< 40	15	18-20	16
40-60	12	15-17	13
60-80	10	13-15	11
80-100	8	11-13	9
> 100	6	9-11	7

Tabla 4.8. Incremento de agua infiltrada en el suelo.

5. APLICACIÓN PRELIMINAR DEL ESQUEMA DE LA ORDENACIÓN AGRO-HIDROLÓGICA, ADOPTADO EN EL PROYECTO EPIC FORCE, A CUENCAS VERTIENTES DE AMÉRICA LATINA SITUADAS EN DIFERENTES ÁMBITOS GEOGRÁFICOS

En los capítulos precedentes se ha mostrado la manera de abordar la ordenación agro-hidrológica de una cuenca vertiente, para atender a los dos problemas que demanda su población:

- a) La seguridad de las personas, de sus bienes y de las infraestructuras ante la aparición de eventos torrenciales o niveo-torrenciales extraordinarios.
- b) El mantenimiento del sistema productivo asociado al medio rural de la cuenca hidrográfica, es decir de la población que vive de la agricultura, la ganadería o los aprovechamientos forestales.

Hay aspectos de las cuencas hidrográficas de montaña de América Latina que son similares a los de las cuencas vertientes de montaña de Europa. En cuanto a las secuelas de la erosión hídrica que se manifiestan en sus suelos, una parte importante de su análisis se puede abordar con las metodologías adoptadas al efecto en las áreas de cultivo de Estados Unidos. Pero las cuencas en cuestión presentan también singularidades específicas que conviene señalar, sobre todo con respecto de las cuencas europeas.

Cuando se iniciaron los trabajos de restauración de montañas (en segunda mitad del siglo XIX), posiblemente las rentas de la sociedad rural europea (al menos de la española) no fuesen muy superiores a las que disponen los actuales campesinos de algunas comarcas de montaña de América Latina. La diferencia entre la Europa de aquella época y la situación presente de América Latina, es que en aquella los desplazamientos de la población entre las grandes ciudades tenían que cruzar ineludiblemente el territorio (no existía otros medios, como la aviación), lo que comprometía más directamente a los gobiernos nacionales a mantener abiertas las vías de comunicación y, en las áreas montañosas, ello implicaba la restauración de las cuencas de montaña; pero, sobre todo, había un Estado con voluntad de afrontar el problema, con presupuestos propios y capacidad jurídica y ejecutiva para realizarlo.

Por otro lado, los suelos de las áreas de montaña de la Europa de aquel tiempo estaban mucho más degradados, de lo que se encuentran hoy en día los suelos de las regiones montañosas de América Latina, que en su mayoría son profundos (si se les compara con los suelos de montaña europeos), aunque en ocasiones estén sometidos a una fuerte erosión. Los suelos europeos tienen la rémora de haber estado sometidos a un aprovechamiento casi continuo desde hace más de dos mil años, por lo que han sufrido una fuerte erosión pretérita; pero por la misma razón presentan con alguna frecuencia trabajos de sistematización de terrenos, efectuados en el pasado para poder aprovecharlos en la agricultura; aunque muchos de estos trabajos de conservación han sido o están siendo abandonados por el éxodo de la población hacia las áreas urbanas.

Pero lo más importante es que, tanto en la Europa de la época de la restauración de las cuencas de montaña, como en Estados Unidos en el momento de la promulgación de la Ley de Conservación de Suelos (1935), la población había llegado al convencimiento que las medidas adoptadas eran necesarias, cuando no imprescindibles; es decir, había

una concienciación de su necesidad, que en el caso de Europa las autoridades lo potenciaron dando trabajo a los campesinos para acometer las labores propias de la restauración, porque con los mismos se contribuía a la mejora de la infraestructura del país. Esta situación es aparentemente muy diferente a la que se vive actualmente en América Latina; aunque, analizando con mayor atención, también en ésta hay preocupación y motivos para haberla; si bien las iniciativas para poner a punto las cuencas vertientes de montaña de América Latina deben ser distintas, porque su realidad es también diferente. A continuación se comentan los aspectos más destacados de cada una de las tres cuencas vertientes estudiadas hasta el momento dentro del Proyecto EPIC FORCE, para las que se propone su ordenación agro-hidrológica.

1. En el caso de la cuenca del río Pejibaye (Costa Rica) es muy difícil plantear a su población la vuelta al bosque original de algunas áreas de la misma muy vulnerables ante la erosión hídrica, aunque sólo sea temporalmente; cuando en los últimos cincuenta años han desmontado casi todo el bosque primario de la cuenca para dedicar sus terrenos a cultivos y pastizales; pero resulta una medida imprescindible para conservar en el futuro las restantes superficies de cultivo o de pastos con las aptitudes requeridas para una rentabilidad sostenida. Se trata de una medida similar a la que tuvieron que adoptar en su momento los agricultores de las áreas cerealistas de Estados Unidos, para asegurar el futuro de sus cosechas; o la sustitución de los pastizales de montaña por el bosque en las laderas de elevadas pendientes ubicadas en las cabeceras de las cuencas, que hubo que llevar a cabo para restaurar las cuencas vertientes a los torrentes de montaña en la Europa de finales del XIX. La cuestión en la cuenca del río Pejibaye es más complicada, pues su agricultura, salvo para productos muy específicos, es de abastecimiento local; pero presenta la ventaja que en ella el bosque secundario, con fines hidrológicos y de protección del suelo, se recupera en un periodo muy corto, entre 5-10 años.
2. Igualmente es muy difícil plantear a la población de la cuenca del río Chanchán (Ecuador) la ordenación agro-hidrológica de la misma, cuando en la actualidad su principal preocupación es posible que se centre en los imponentes deslizamientos rotacionales ubicados en algunos tramos asociados con su red de drenaje y éstos (que se encuentran aún sin corregir plenamente, aunque se realice todo lo posible por subsanarlo con los medios disponibles) no se resuelven con la ordenación agro-hidrológica de la cuenca. Sin embargo, no plantear su ordenación agro-hidrológica en este momento, cuando todavía se dispone de unas potencialidades de recuperación muy elevadas, puede suponer en el futuro, sobre todo a largo plazo, unas medidas más traumáticas y unas inversiones más costosas. Como situaciones que están necesitando de una pronta ordenación se comentan las dos siguientes: 1) La roturación del páramo para ocuparlo con cultivos, supone la pérdida de las condiciones hidrológicas de una gran superficie de la cuenca, que ninguna medida posterior podrá en el futuro recomponerlo a medio plazo. - la repoblación de las cabeceras de cuenca, que se plantea en los manuales europeos, es una solución para suelos pobres, como lo eran los suelos de montaña europeos cuando se inició su restauración, o como lo serán los que ocupan actualmente el páramo después de su roturación y cultivo ocasional. - 2) El uso para pastizales, de escasa rentabilidad y sin ninguna medida de conservación de suelos, de extensas superficies de laderas de fuertes pendientes, supone una pérdida progresiva de potencialidad del suelo y hasta un riesgo de futuros deslizamientos superficiales; solo la necesidad puede justificar tales usos, pero se trata de encontrar alternativas.

Sin embargo, ambas circunstancias se dan y casi pasan desapercibidas, porque la potencialidad agraria de la cuenca en el presente es elevada y porque la cuenca es tan grande, que resulta muy difícil detectar todas sus carencias con precisión y cualquier actividad restauradora es muy costosa.

Precisamente por la extensa superficie que ocupa la cuenca del río Chanchán, aunque sea posible plantear para ella su ordenación agro-hidrológica, al menos en una primera aproximación, su posterior restauración hidrológico-forestal resulta inviable; porque no es posible detallar las futuras acciones. Por ello, se adjunta también la ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente a su afluente el río Guabalcón, que se ajusta mejor a una posterior restauración hidrológico-forestal.

3. Finalmente, en el caso de la cuenca del arroyo de Buena Esperanza situado en la provincia de Tierra de Fuego (Argentina), la protección que ejerce su bosque actual, ubicado en el tramo medio de la cuenca, a la ciudad de Ushuaia, situada en su área dominada, es indiscutible y muy importante. Para valorarlo, basta con considerar el elevado coste que supondría la realización de unas infraestructuras, que pudieran hacer las mismas funciones hidrológicas, de control de la erosión del suelo y de protección de la ciudad que actualmente desempeña dicho bosque, para el hipotético caso de que éste desapareciera. Además, al coste de las obras de infraestructura, habría que añadir los costes de su posterior mantenimiento y, lo que posiblemente sea más grave para su futuro, que Ushuaia podría perder parte de su belleza actual, que le crea el marco preciso para ser una excelente ciudad turística.

El modo de plantear la ordenación de esta cuenca, puede ser muy similar al que se utiliza en las cuencas de montaña europeas con un elevado componente turístico, pues los problemas a resolver son semejantes. Cabe señalar que la ordenación de la cuenca del arroyo de Buena Esperanza puede servir de modelo para la ordenación de otras cuencas de montaña de la región Patagónica.

Las tres cuencas estudiadas en este texto presentan claras diferencias entre ellas; si bien en las tres su principal problema aparece cuando irrumpe en ellas un evento torrencial o niveo-torrencial extraordinario y en las tres también se puedan utilizar elementos comunes, especialmente las cubiertas arboladas, para su ordenación agro-hidrológica, aunque no siempre aplicados de la misma manera. Algunas diferencias importantes se muestran a continuación.

- a) En las cuencas de los ríos Pejibaye (Costa Rica) y Guabalcón (Ecuador) es totalmente necesario resolver la componente agronómica de la cuenca, es decir, que la población que vive en ellas de la agricultura y la ganadería, mantenga la posibilidad de seguir en el futuro con dichas actividades mejorando su calidad de vida. También es muy importante tener en cuenta el tipo de agricultura y ganadería que realizan, que difiere del que se practica en la mayoría de las regiones de Europa y Estados Unidos de manera extensiva; en todo caso, se podría comparar con la agricultura de montaña europea, con todas las limitaciones que presenta para el uso de la maquinaria agrícola, por causa de las características orográficas de los terrenos que dificultan su utilización.

- b) En la cuenca del arroyo de Buena Esperanza (Argentina) no existen problemas agronómicos, pero su población utiliza otros recursos de la cuenca, como su disponibilidad de agua o su capacidad para destinarla a usos recreativos, etc., que también precisan de ordenación.

Pero estos problemas específicos, para los que hay que encontrar soluciones si se quiere llevar a cabo la ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente, no deben empañar los dos objetivos fundamentales establecidos para este propósito en el Proyecto EPIC FORCE.

Cada cuenca tiene sus problemas específicos, la cuestión está en: 1) identificarlos, 2) investigar sobre ellos, 3) establecer las medidas pertinentes para corregirlos y 4) saber transmitir estas medidas a la población de la cuenca, antes de que sea tarde para aplicarlas. El esquema planteado para el estudio y la ordenación agro-hidrológica de cada una de las tres cuencas incluye los siguientes aspectos:

- a. Una breve descripción del estado físico de cada cuenca vertiente objeto de la ordenación agro-hidrológica.
- b. El enfoque principal que parece más razonable y prioritario para abordar la ordenación agro-hidrológica en cada una de las cuencas.
- c. Tablas resumen de la ordenación agro-hidrológica de cada una de las cuencas.

Implícitamente, se considera en todo momento las dos situaciones que tienen lugar en la cuenca vertiente: 1) ante eventos torrenciales extraordinarios y 2) durante los periodos que transcurren entre dos eventos extremos consecutivos; aunque en las tablas resumen esta circunstancia se difumina, en favor del enfoque principal adoptado para la ordenación agro-hidrológica en cada cuenca.

5.1. ORDENACIÓN AGRO-HIDROLÓGICA DE LA CUENCA VERTIENTE AL RÍO PEJIBAYE (COSTA RICA)

5.1.1. Breve descripción del estado físico de la cuenca vertiente al río Pejibaye.

En lo que a continuación se refiere, se estudia la cuenca vertiente al río Pejibaye hasta su confluencia con el río Águilas. Ésta se ubica en el cantón de Pérez Zeledón al suroeste de Costa Rica, entre los 83° 33' y los 83° 42' de longitud oeste y los 9° 9' y los 9° 13' de latitud norte. Su cota máxima es 1.176 m y la mínima 375 m. La cuenca vierte sus aguas hacia el Pacífico y tanto hidrológica como climáticamente se trata de una típica *cuenca tropical de media montaña*, con alternancia de estaciones lluviosa y seca y un módulo pluviométrico superior a los 2.000 mm. Su superficie es de 132,02 Km². Presenta una orografía es muy accidentada, con una pendiente media del 27 % y una morfología óvalo-redonda.

Los suelos de la cuenca son todos ellos profundos, ácidos y bien drenados; los situados en la zona norte de la cuenca presentan textura fina y son poco permeables (Ustic Haplohumutl), mientras que los situados al sur muestran una textura moderadamente fina, son menos profundos y más permeables que los situados al norte (Ustic Dystropets); la vulnerabilidad de ambos tipos de suelos a la erosión es alta y en terrenos de elevadas pendientes son frecuentes los deslizamientos superficiales, cuya aparición

coincide normalmente con la ocurrencia de fuertes aguaceros torrenciales en los periodos lluviosos, o con los eventos torrenciales extraordinarios que tienen lugar en la zona.

En cuanto al uso del suelo, hace cincuenta años prácticamente toda la cuenca estaba cubierta por un bosque tropical de media montaña, que fue desmontado en gran parte por sus anteriores o actuales propietarios para dedicarlo a cultivos y pastizales. En la actualidad el 50 % de la cuenca lo ocupan los cultivos, repartidos entre *cafetales de sombra* (normalmente ubicados en terrenos abancalados y con medidas de conservación de suelos), *cultivos rotacionales maíz-frijol o viceversa* (en los que también se están iniciado trabajos de conservación de suelos) y *otros cultivos* como el tiquizque o el jengibre, en ocasiones en combinación con el maíz; otro 45 % de la cuenca se dedica a *pastizales permanentes de ganadería intensiva* y sólo un 5 % se ha reservado al *bosque*, prácticamente todo él secundario.

Aunque la cuenca muestra en algunas de sus zonas síntomas de serios problemas erosivos, especialmente deslizamientos superficiales; su capacidad bio-climática es muy elevada, hasta el punto que la mayoría de los terrenos dedicados a cultivos y pastizales pueden retornar de nuevo a un bosque tropical secundario, simplemente con abandonar en los mismos los citados aprovechamientos. Un bosque secundario, aunque desde el punto de vista de la biodiversidad no se identifique con el bosque primario, en el aspecto hidrológico tiene un comportamiento semejante.

La población de la cuenca se estima en unos 10.000 habitantes, que viven de los recursos que ésta les proporciona; comprende todas las clases de edad y está diseminada por toda la cuenca en pequeños núcleos; el más importante de ellos es el de Pejibaye situado en el tramo final de la cuenca en cuestión y próxima al río del mismo nombre.

5.1.2. Enfoque principal de la ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al río Pejibaye

El principal objetivo en la cuenca del río Pejibaye, además de su protección ante los eventos torrenciales, especialmente ante los extraordinarios, es su aprovechamiento agronómico sostenido a largo plazo; es decir, la conservación de la capacidad productiva de la cuenca para que continúe manteniendo a su población. La cuenca tiene un clima tropical de media montaña, de alto potencial bio-climático y unos suelos profundos y bien drenados, pero muy vulnerables a la erosión hídrica; por lo que requieren de un estricto control, bien mediante el mantenimiento de adecuadas cubiertas vegetales permanentes, o a través de las pertinentes medidas de conservación de suelos, dependiendo de los usos a los que se dediquen.

5.1.3. Tabla de la ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al río Pejibaye

Los criterios adoptados en la Tabla 5.1 responden a las indicaciones recogidas en los textos clásicos tanto de *Clasificación Agrológica de Suelos*, como de *Conservación de Suelos*, pero aplicados con sentido práctico a la realidad de la cuenca del río Pejibaye; pues una ordenación que no tenga en cuenta la realidad, no resulta viable.

A los diferentes espacios de la cuenca vertiente se les ha asignado uno de los tres *objetivos* siguientes en la ordenación agro-hidrológica: 1) *Protección*; 2) *Producción sostenible* y 3) *Producción*. La interpretación de los mismos se comenta a continuación.

Las áreas de *protección* comprenden las superficies de la cuenca en las que la cubierta vegetal debe ser permanente y con estructura de arbolado, incluyéndose en dicha clasificación las superficies de más del 60 % de pendiente y los márgenes y riberas de los cursos que drenan por la cuenca. También se incorporan en esta clasificación las actuales superficies de bosque secundario (que solo abarca el 5 % de la cuenca) y aquellas áreas de pendientes superiores al 30 % en las que aparecen deslizamientos superficiales o síntomas muy graves de erosión y deterioro del suelo. En éstas últimas se propone permitir que el bosque secundario invada las superficies afectadas por los procesos graves de erosión acelerada, como medio de detenerlos, para lo que es necesario que el medio conserve la capacidad suficiente para regenerar el bosque secundario.

Las áreas de *producción sostenible* se interpretan (en este texto) en el sentido de sostenible para mantener a la población conjuntamente con la capacidad del medio para garantizar el aprovechamiento sustentable, que es el objetivo final que se persigue y que sólo se conseguirá si la población colabora en tal sentido. Con este propósito se clasifican como tales a los terrenos dedicados a pastizales comprendidos entre el 30 y el 60 % de pendiente, mientras en ellos no ocurran ni deslizamientos superficiales ni síntomas de erosión acelerada, y a los cultivos en pendientes superiores al 12 % que se den las mismas circunstancias.

Experimentalmente está comprobado que en pendientes superiores al 30 % los pastizales pueden sufrir procesos de erosión acelerada ante eventos torrenciales extraordinarios, lo que implica que existe el riesgo, pero no que tenga que producirse. Aunque, una vez producido, el pastizal afectado pasaría automáticamente al objetivo anterior de *protección*, adoptándose las medidas pertinentes asociadas con el nuevo objetivo. En todas las regiones del mundo hay pastizales en pendientes superiores al 30 % y en muchas ocasiones en una situación estable o pseudo-estable; además, el hecho de que exista riesgo de una erosión acelerada ante un evento torrencial extraordinario, no impide a un pastizal bien conservado proteger al suelo de la erosión hídrica en pendientes superiores al 30 % ante lluvias ordinarias. La cuestión está en que el pastizal debe estar bien conservado y, conforme aumenta la pendiente en la ladera, la buena conservación del pastizal se hace más difícil y costosa; por lo que no se debe superar la pendiente del 60 % en los pastizales, porque el paulatino deterioro del suelo es evidente y el riesgo de deslizamientos superficiales muy elevado. Los pastizales en terrenos de más de un 60 % de pendiente son una mala inversión, sobre todo a medio y largo plazo.

Con los cultivos se plantea un razonamiento similar, en los terrenos de más de un 12 % de pendiente se requieren de prácticas de conservación de suelos para controlar en ellos la erosión hídrica del suelo. Tratándose de prácticas muy perfeccionadas como las que se emplean en los *cafetales de sombra* (abancalado del terreno y fijación del suelo con plantas de porte arbóreo para la sombra, a lo que se añade que la hojarasca del cafetal cubre la superficie del suelo) el cultivo se puede extender en laderas de hasta pendientes muy elevadas (incluso del orden del 40 %).

En otros cultivos las prácticas de conservación de suelos son más sencillas y las pendientes de ladera no deben superar el 24 % y siempre aplicándose las prácticas de conservación de suelos pertinentes, como se recomienda en los manuales de *Conservación de Suelos*, pero también se deben considerar los aperos utilizados en la labranza pues, cuando éstos remueven poco al suelo, la vulnerabilidad de éste ante la erosión hídrica disminuye. En cualquier caso, la aparición de los fenómenos de erosión acelerada, debe ser el criterio a adoptar para el límite de la pendiente de cultivo.

Finalmente, se han definido como áreas de *producción*, los pastizales ubicados en laderas con pendientes inferiores al 30 % y los cultivos practicados en terrenos con pendientes inferiores al 12 %; aunque se debe asumir que en los mismos también se deben tomar las medidas adecuadas para conservar tanto los pastizales como los cultivos, pues aunque se trate de situaciones óptimas para tales usos, ello no impide que aparezca la erosión hídrica en el suelo, si las actividades productivas en cuestión no se realizan convenientemente.

En relación con los principales cursos que drenan por la cuenca vertiente al río Pejibaye, el propio río Pejibaye y sus afluentes el río Platanares y la quebrada Bolívar, así como con las restantes quebradas que confluyen en ellos, en condiciones normales (para un día cualquiera en el que no ocurre un eventos torrencial extraordinario), la situación que muestran es de total equilibrio, no se aprecian síntomas de graves procesos erosivos ni en los márgenes ni en el propio lecho de los citados cursos; incluso las quebradas presentan estructuras en salto-resalto (*step-pool*) o en rápido-remanso (*ripple-pool*) en sus diferentes tramos. A ello ha podido contribuir que los dos márgenes de todos los cursos mencionados están protegidos por una densa franja de bosque tropical (posiblemente secundario) en buen estado de conservación y extendido en la mayor parte de su recorrido. Esta actuación, que se contempla en la legislación forestal del país, pone de manifiesto la importancia de la presencia de vegetación arbolada en los márgenes de los ríos y torrentes para la conservación de sus cauces, por lo que es fundamental que se continúe con ella en el futuro

Sin embargo, con ocasión de eventos torrenciales extraordinarios, hay informes que aseguran que los citados cursos se llenan de sedimentos, posiblemente procedentes de las fuertes erosiones que tengan lugar en sus cuencas vertientes, pues en los lechos de los cursos en cuestión no se detectan síntomas de haber sufrido fuertes alteraciones. Con esta observación se quiere insistir en la necesidad de que la propia cuenca vertiente del río Pejibaye en su conjunto debe disponer de una cubierta vegetal conveniente, que proteja a sus zonas más vulnerables ante la erosión hídrica, porque con ello también se contribuye al equilibrio de sus cursos de drenaje.

Altitud	Pendiente p (%)	Cubierta vegetal		Tipo de suelos	Principales problemas de erosión	Capacidad de regeneración bio-climática	Uso del territorio compatible con el objetivo principal de la ordenación agro-hidrológica	
		Actual	Adecuada				Actuaciones	Objetivo
Area dominante > 700 m	p>30	Bosque secundario	Bosque secundario	En general profundos	No se detectan	Alta	Mantener el bosque secundario	Protección
	p> 60	Pastizales extensivos	Bosque secundario	En general profundos	1)Deslizamientos superficiales 2)Erosiones superficiales	Se estima alta	Permitir la invasión del bosque secundario cuando aparezcan deslizamientos o problemas serios de erosión	Protección
	60>p>30		1) Pastizales mientras no aparezcan problemas erosivos graves. 2) Bosque secundario, si aparecen	1)Deslizamientos superficiales 2)Erosiones superficiales 3) Pérdida de productividad del suelo	1) Permitir la invasión del bosque secundario cuando aparezcan deslizamientos o problemas serios de erosión. 2) Sustituir (hasta p < 40 %) por cultivos abancalados rigurosamente controlados (cafetales de sombra) 3) Investigar otros usos que aseguren la protección del suelo		Protección/ Producción sostenible	
	P<30		Pastizales extensivos bien conservados	Profundos	1)Erosiones superficiales 2) Pérdida de productividad del suelo.		Mejorar las técnicas de empleo del pastizal	Producción
	60>p>30	Cafetales de sombra	Cafetales de sombra	Profundos	No se detectan, salvo en algunos casos en los lindes del cultivo	Se estima alta	Mantener el cafetal de sombra extremando mucho los cuidados, especialmente en los lindes del cultivo	Producción sostenible
p<30	Mantener el cafetal de sombra, extremar los cuidados en los lindes del cultivo							

Tabla 5.1. Ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al río Pejibaye hasta su confluencia con el río Águilas (cantón de Pérez Zeledón, Costa Rica)

Altitud	Pendiente p (%)	Cubierta vegetal		Tipo de suelos	Principales problemas de erosión	Capacidad de regeneración bio-climática	Uso del territorio compatible con el objetivo principal de la ordenación agro-hidrológica.	
		Actual	Adecuada				Actuaciones	Objetivo
Area dominante > 700 m	p>30	Cultivos en rotación: Maíz-fríjol / viceversa. Otros cultivos (como el jengibre o tiquizque) a veces incluyendo el maíz.	1) Bosque o Pastizal 2) Agrícola con prácticas serias de conservación de suelos solo mientras no aparezcan problemas graves de erosión	profundos	1)Deslizamientos superficiales 2)Erosiones superficiales 3) Pérdida de productividad del suelo	Se estima alta	1) Bosque o Pastizal 2) Permitir la invasión del bosque secundario cuando aparezcan deslizamientos o problemas serios de erosión. 3) Sustituir (hasta p < 40 %) por cultivos abancalados rigurosamente controlados (cafetales de sombra) 4) Investigar otros usos que aseguren la protección del suelo	Protección/ producción sostenible
	30>p>24		1) Pastizales 2) Agrícola con prácticas de conservación de suelos		1)Erosiones superficiales 2) Pérdida de productividad del suelo		1) Pastizales 2) Mantener los cultivos extremando las prácticas de conservación de suelos. 3) Si la erosión es fuerte, permitir la invasión temporal del bosque.	Producción sostenible
	24>p>12		Agrícola con prácticas de conservación de suelos		1)Erosiones superficiales 2) Pérdida de productividad del suelo		1) Mantener los cultivos, con prácticas de conservación de suelos 2) Extremar las prácticas de conservación en los casos del jengibre o el tiquizque, que no cubren por completo al suelo	Producción sostenible
	p<12		Agrícola		Erosión laminar		Mantener los cultivos.	Producción
	p<12	Márgenes y riberas	Bosque secundario	profundos	Tracción de la corriente.	Alta	Mantener el bosque secundario y si no existe introducirlo	Protección

Tabla 5.1. (Continuación 1) Ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al río Pejibaye hasta su confluencia con el río Águilas (cantón de Pérez Zeledón, Costa Rica)

Altitud	Pendiente p (%)	Cubierta vegetal		Tipo de suelos	Principales problemas de erosión	Capacidad de regeneración bio-climática	Uso del territorio compatible con el objetivo principal de la ordenación agro-hidrológica.	
		Actual	Adecuada				Actuaciones	Objetivo
Area dominada < 700 m	p>30	Bosque secundario	Bosque secundario	En general profundos	No se detectan	Alta	Mantener el bosque secundario	Protección
	p>30	Pastizales extensivos.	1) Pastizales mientras no aparezcan problemas erosivos graves. 2) Bosque secundario si aparecen	Profundos	1)Deslizamientos superficiales 2)Erosiones superficiales 3) Pérdida de productividad del suelo.	Se estima alta	1) Permitir la invasión del bosque secundario cuando aparezcan deslizamientos o problemas serios de erosión. 2) Sustituir (hasta p < 40 %) por cultivos abancalados rigurosamente controlados (cafetales de sombra) 3) Investigar otros usos que aseguren la protección del suelo	Protección/ Producción sostenible
	p<30		Pastizales extensivos bien conservados		1)Erosiones superficiales 2) Pérdida de productividad del suelo.		Mejorar las técnicas de empleo del pastizal	Producción
	p<40	Cafetales de sombra.	Cafetales de sombra.	Profundos	No se detectan, salvo en algunos casos en los lindes del cultivo	Se estima alta	Mantener el cafetal de sombra, extremando los cuidados en los lindes del cultivo	Producción sostenible

Tabla 5.1. (Continuación 2) Ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al río Pejibaye hasta su confluencia con el río Águilas (cantón de Pérez Zeledón, Costa Rica)

Altitud	Pendiente p (%)	Cubierta vegetal		Tipo de suelos	Principales problemas de erosión	Capacidad de regeneración bio-climática	Uso del territorio compatible con el objetivo principal de la ordenación agro-hidrológica.	
		Actual	Adecuada				Actuaciones	Objetivo
Area dominada < 700 m	p>30	Cultivos en rotación: Maíz-fríjol / viceversa. Otros cultivos (como el jengibre o tiquizque) a veces incluyendo el maíz.	1) Bosque o Pastizal 2) Agrícola con prácticas serias de conservación de suelos solo mientras no aparezcan problemas graves de erosión	profundos	1)Deslizamientos superficiales 2)Erosiones superficiales 3) Pérdida de productividad del suelo	Se estima alta	1) Bosque o Pastizal 2) Permitir la invasión del bosque secundario cuando aparezcan deslizamientos o problemas serios de erosión. 3) Sustituir (hasta p < 40 %) por cultivos abancalados rigurosamente controlados (cafetales de sombra) 4) Investigar otros usos que aseguren la protección del suelo	Protección/ producción sostenible
	30>p>24		1) Pastizales 2) Agrícola con prácticas de conservación de suelos		1)Erosiones superficiales 2) Pérdida de productividad del suelo		1) Pastizales 2) Mantener los cultivos extremando las prácticas de conservación de suelos. 3) Si la erosión es fuerte, permitir la invasión temporal del bosque.	Producción sostenible
	24>p>12		Agrícola con prácticas de conservación de suelos		1)Erosiones superficiales 2) Pérdida de productividad del suelo		Mantener los cultivos, con prácticas de conservación de suelos Extremar las prácticas de conservación en los casos del jengibre o el tiquizque, que no cubren por completo al suelo	Producción sostenible
	p<12		Agrícola		Erosión laminar		Mantener los cultivos.	Producción
	p<12	Márgenes y riberas	Bosque secundario	profundos	Tracción de la corriente.		Alta	Mantener el bosque secundario y si no existe introducirlo

Tabla 5.1. (Continuación 3) Ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al río Pejibaye hasta su confluencia con el río Águilas (cantón de Pérez Zeledón, Costa Rica)

5.2. ORDENACIÓN AGRO-HIDROLÓGICA DE LA CUENCA VERTIENTE AL RÍO CHANCHÁN (ECUADOR)

5.2.1. Breve descripción del estado físico de la cuenca vertiente al río Chanchán.

El río Chanchán es afluente al río Guayas que desemboca en el Océano Pacífico. La cuenca *intramontana* del río Chanchán se ubica en la Sierra Occidental de la región Andina del centro del Ecuador; entre los 77° 37' 15" y los 78° 09' 26" de latitud oeste y los 2° 00' 41" y los 2° 26' 21" de latitud sur (UTM zona 17S: latitud. 9730243 – 9777493; longitud 704927 – 764657). El punto más alto en la cordillera Occidental se encuentra en la loma Boliche (4.506 m) al sur de la cuenca, en la parte alta de la subcuenca del río Chullabamba. En la cordillera Real el punto más alto es el Aquililloma (4.198 m). La zona más baja se encuentra en Cumandá, en el oeste de la cuenca, donde confluyen el río Azul y el río Chanchán (300 m). La superficie total de la cuenca es de 1409,43 Km², la mitad de la cual tiene cotas superiores a los 1500 m y presenta unas características típicas de la *zona tropical de montaña* americana. Sus laderas muestran relieves abruptos, mientras que las cimas de los contrafuertes son redondeadas; su pendiente media es del 34,6 %, con un 58,6 % de la misma con pendientes superiores al 30 % y su morfología es rectangular a oblonga. Administrativamente pertenece a la provincia de Chimborazo, salvo una pequeña parte del sur de la cuenca que corresponde a la provincia de Cañar.

Las características que mejor definen a la cuenca, que a su vez coinciden con sus principales problemas a resolver, son las siguientes: 1) En algunas secciones de su red de drenaje existen deslizamientos rotacionales de carácter estructural o hay riesgo de ellos. 2) La cuenca está deforestada en una porción importante de su superficie y, debido a su altitud, el bosque secundario no invade el territorio de modo inmediato, como ocurre en áreas tropicales de media montaña (como, por ejemplo, en la cuenca del río Pejibaye en Costa Rica); sin embargo, en las superficies donde se han realizado repoblaciones, éstas han respondido con buenos crecimientos. 3) La presión social y una desafortunada reforma agraria, llevada a cabo en la década de los sesenta del siglo pasado, ha extendido las superficies de cultivo por toda la cuenca, alcanzando no sólo terrenos de pendientes muy elevadas, del orden del 60 % e incluso superiores, sino que también se ha llegado a roturar áreas de páramo en la cabecera de la cuenca, creando un grave peligro para la conservación de los Andosoles de estas zonas, que en su estado original ejercen un papel hidrológico de gran relevancia en el conjunto de la cuenca del río Chanchán. 4) La alternancia en la cuenca de estaciones lluviosa y seca, propia de los trópicos, afecta seriamente durante la segunda a los cultivos y pastizales, lo que motiva la puesta en riego de parcelas con pendientes elevadas, utilizando técnicas originales, pero que necesitan importantes inversiones para modernizarlas y disminuir con ello los riesgos de erosión. 5) Por otro lado, la cuenca presenta en general suelos profundos y ello permite mantener su rentabilidad, aún cuando se trata de terrenos en pendientes y la erosión superficial en los mismos sea importante cuando ocurren precipitaciones torrenciales. 6) Los cursos que drenan por la cuenca presentan fuertes pendientes e importantes erosiones lineales por causa de la abrasión del cauce por la corriente, cuando se presentan avenidas torrenciales.

5.2.2. Enfoque principal de la ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al río Chanchán.

El problema de los deslizamientos rotacionales estructurales supera el ámbito propio de la ordenación agro-hidrológica; pero como el control de todo lo que sucede en la cuenca se debe asumir por cualquier ordenación que se realice a la misma, se plantea la instalación y

mantenimiento de sistemas de vigilancia y alerta para tales movimientos del terreno, para tratar con ello de prevenir riesgos para la población. Los deslizamientos que existen en la cuenca del río Chanchán resultan espectaculares, tanto por sus dimensiones como por su peligrosidad; la solución a los problemas que plantean debe contemplarse dentro de las técnicas específicas de ingeniería civil. Solo los deslizamientos superficiales se pueden tratar de corregir con técnicas típicas de la restauración hidrológico-forestal.

Al margen del problema de los deslizamientos, la cuenca vertiente al río Chanchán precisa de una ordenación agro-hidrológica, para garantizar un futuro mejor a la población que vive en ella aprovechando sus recursos, especialmente el suelo y el agua, pero al mismo tiempo conservándolos. Dicho de otro modo, el objetivo principal de la ordenación agro-hidrológica de la cuenca del río Chanchán es su aprovechamiento sustentable a medio y largo plazo. Además, es muy conveniente plantear dicha ordenación a partir de la situación actual, cuando la cuenca aún dispone de unas potencialidades de recuperación agropecuaria elevadas; pues en el futuro las medidas a adoptar resultarían más traumáticas y costosas, para conseguir posiblemente una menor efectividad. Aunque este objetivo coincide esencialmente con el establecido para la cuenca del río Pejibaye (Costa Rica), el modo de planificarlo y de aplicar las técnicas para alcanzarlo difieren, porque las características de la cuenca del río Chanchán son diferentes a las de la cuenca del río Pejibaye.

Dado que la superficie de la cuenca del río Chanchán es tan extensa, en su ordenación agro-hidrológica se deben priorizar las acciones, atendiendo a su mayor a menor incidencia en el esquema general de la ordenación, que tiene por objetivos generales: 1) la protección de la cuenca ante eventos torrenciales y 2) su aprovechamiento sostenido. En este orden de prelación se han planteado las actuaciones siguientes:

1. La conservación de los Andosoles del páramo, por la gran función hidrológica que desarrollan en el conjunto de la cuenca del río Chanchán.
2. La recuperación de la vegetación natural de tipo leñoso, especialmente el arbolado, en aquellas superficies de pendientes elevadas (superiores al 60 %), que presentan serios problemas de erosión superficial (deslizamientos superficiales, movimientos visibles de reptación, barranqueras, etc.) y que mantienen aprovechamientos de escasa o nula rentabilidad.
3. Una clasificación de las áreas de cultivo de la cuenca del río Chanchán, atendiendo a los criterios de la *Clasificación Agrológica de Suelos* y a la realidad física y socio-económica de la misma.
4. Un estudio de los aspectos geo-torrenciales de los cursos que drenan por la cuenca, para avenidas con diferentes periodos de recurrencia.

Pero de estas cuatro actuaciones, sólo las dos primeras se pueden tratar con cierta precisión en una cuenca con unas dimensiones tan grandes como la del río Chanchán. La primera porque el páramo es un ecosistema muy singular, que tiene un comportamiento muy específico y además está perfectamente localizado en el territorio dentro de la cuenca. La segunda porque representa un problema que es fácil de delimitar, aunque para su resolución se necesita utilizar a posteriori una escala de trabajo más detallada, pues en esta fase hay que considerar también las soluciones coyunturales a los problemas socio-económicos de la gente que los puebla, dado que las actuaciones se desarrollan en su territorio y éste tiene sus propietarios y sus arrendatarios, con los que hay que dialogar, proponer y discutir las soluciones para mejorar el estado de las superficies de la cuenca que se comentan. Las dos acciones restantes necesitan

desde un primer momento de una escala de trabajo más detallada, por lo que se deben plantear en cuencas vertientes de menor superficie (< 150 Km²).

A continuación se desarrolla el contenido de las dos primeras acciones y se plantea la ordenación agro-hidrológica de la cuenca del río Chanchán en una primera aproximación en sus tablas correspondientes. En los epígrafes posteriores se desarrolla la ordenación agro-hidrológica de la cuenca del río Guabalcón (65,83 Km²), afluente del río Chanchán, en la que se contemplan esquemáticamente las cuatro acciones comentadas.

En lo que respecta a los Andosoles del páramo, éstos desempeñan una importante función en el conjunto de la cuenca vertiente, porque son suelos muy higroscópicos, lo que les permite retener una gran cantidad de agua en la cabecera de la cuenca, que posteriormente va drenando lentamente hacia aguas abajo. Su función es similar al que desempeñan los bosques de cabecera en otras cuencas vertientes, pero con las ventajas añadidas de que el *páramo* no tiene las limitaciones que el timber line impone al bosque y que la capacidad de retención de agua de los Andosoles puede superar al de los suelos forestales de las áreas de bosque.

La roturación del páramo para dedicarlo a cultivos ocasionales, supone la pérdida de sus condiciones hidrológicas, que ninguna medida posterior podrá recomponerlo en el futuro. Además el componente o material mineral de los Andosoles es muy ligero, por lo que cuando éstos se roturan, la erosión hídrica en los mismos es muy intensa. En definitiva, la roturación de los Andosoles implica su pérdida. El páramo es un ecosistema a conservar porque, además de una singularidad ecológica, es útil para el mantenimiento del sistema productivo de toda la cuenca.

Una cuestión importante relacionada con el páramo, es el tema de las repoblaciones forestales que se han efectuado sobre el mismo, bien antes o bien después de su roturación y puesta en cultivo. Al respecto se comenta lo siguiente:

1. En principio, donde en la actualidad existe el páramo, la opción prioritaria es conservarlo tal como está.
2. Las repoblaciones que se realizaron en el pasado sobre el propio páramo, han tenido unos crecimientos extraordinarios, porque se han visto favorecidas de la capacidad higroscópica de los Andosoles; lo que lógicamente afectó a las fuentes situadas aguas abajo de las áreas repobladas, sobre todo en el transcurso del primer crecimiento de dichas repoblaciones, que se corresponde con el de mayor consumo de agua por ellas. Lo previsible, de acuerdo con los resultados de las investigaciones realizadas por **Hibbert** (1967); **Swift & Swank** (1981); **Kuczera** (1987); **Swank et al.** (2001) entre otros, no precisamente sobre el páramo, sino sobre las necesidades hídricas de las repoblaciones, es que cuando la repoblación alcance su madurez (el arbolado final), sus necesidades hídricas se estabilizarán y las fuentes situadas aguas abajo previsiblemente incrementaran de nuevo su caudal, hasta alcanzar un valor próximo al que tenían antes de efectuarse las repoblaciones. Por tanto, una opción para el futuro, podría ser realizar un aprovechamiento racional del arbolado conseguido con la repoblación, con una ordenación dasocrática adecuada de éste, que no altere las fuentes situadas aguas abajo; porque el arbolado una vez instalado no altera sustancialmente las condiciones del páramo, únicamente es una opción en la que el páramo se aprovecha y esto al comienzo de las repoblaciones tuvo un coste importante (que seguramente no estuvo previsto); pero en la actualidad este coste se puede reducir a límites tolerables y el arbolado ofrece

- también otras ventajas a las áreas dominadas de la cuenca en el caso de eventos torrenciales extraordinarios.
3. Las repoblaciones realizadas en suelos que en el pasado estuvieron ocupados por el páramo, pero que posteriormente fueron roturados para ponerlos en cultivo agrícola y, cuando éstos dejaron de ser productivos, se repoblaron; la cuestión es muy diferente. Inicialmente, la función hidrológica de la nueva repoblación será prácticamente nula, la misma más o menos de la que cabe esperar del perfil edáfico resultante tras la roturación del páramo y la erosión posterior de sus suelos. Lógicamente no perjudicará a las fuentes situadas aguas abajo, porque éstas habrán desaparecido previamente junto con el propio páramo. Con el tiempo, si la repoblación consigue consolidarse, generará su propio suelo forestal, que permitirá retener agua en sus poros y a largo plazo incluso podrá alimentar a las fuentes situadas aguas abajo; pero es muy difícil que se llegue a las condiciones tan favorables que proporcionaba el primitivo páramo.

En lo que se refiere a la recuperación de la vegetación natural de tipo leñoso, especialmente el arbolado, en aquellas superficies de pendientes elevadas (superiores al 60 %), que presentan serios problemas de erosión superficial y que mantienen unos aprovechamientos de escasa o nula rentabilidad, provocando una pérdida progresiva de potencialidad del suelo y hasta una amenaza de futuros deslizamientos superficiales; a la escala de trabajo de toda la cuenca del río Chanchán lo único que se puede plantear es: 1) delimitar en el territorio dichas superficies; 2) priorizarlas por su estado de erosión, vulnerabilidad y posición estratégica que ocupan dentro de la cuenca y 3) proponer soluciones atendiendo a la capacidad de regeneración que presentan las respectivas zonas en cuestión. Las actuaciones definitivas se deben plantear tras considerar también las condiciones socio-económicas que se presentan en las diferentes áreas afectadas y ello conllevaría a realizar, como paso previo, un análisis agronómico de las mismas, pues dentro dichas superficies se podrían encontrar enclaves que pudieran cultivarse utilizando estrictas medidas de conservación de suelos; pero estas cuestiones exigen una escala de mayor detalle para poder resolverlas.

5.2.3. Tabla de la ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al río Chanchán

En la Tabla 5.2 se han utilizado los mismos términos de *protección*, *producción sostenible* y *producción* empleados en la tabla anterior, para asignar los objetivos de la ordenación agro-hidrológica a los diferentes espacios de la cuenca del río Chanchán y también se ha asumido la misma filosofía para interpretarlos. Sin embargo, al situarse esta cuenca en una región de alta montaña, no se puede esperar que ocurra la invasión del bosque secundario de forma espontánea como en la cuenca del río Pejibaye; por tanto, en los supuestos en los que se plantee el establecimiento de cubiertas arboladas, éstas se tendrán que lograr permitiendo que el bosque montano siempre verde se desarrolle donde aún exista o, en las restantes situaciones, recurriendo a la repoblación forestal. Además, la cuenca en cuestión presenta algunas prácticas relacionadas con los cultivos y pastizales, que son más propias para tratar en cuencas de menor extensión.

Altitud	Pendiente p (%)	Cubierta vegetal		Tipo de suelos	Principales problemas de erosión	Capacidad de regeneración bio-climática	Uso del territorio compatible con el objetivo principal de la ordenación agro-hidrológica.	
		Actual	Adecuada				Actuaciones, Recomendaciones	Objetivo
Una cuestión importante dentro de la cuenca del río Chanchán, que no puede ser abordada con la ordenación agro-hidrológica, pero que tampoco se puede ignorarla, porque condiciona el modo de vida de la población que se ve afectada directamente por ella, son los importes deslizamientos rotacionales que se presentan en varias secciones del drenaje de su curso principal.								
Área dominante > 3000 m Partes altas del área dominante >3600 m	Existen diferentes tipos de pendientes pero abundan áreas de pendientes suaves p<12	Vegetación de páramo	Vegetación de páramo	1) Andosoles, profundos, de muy poca densidad y de carácter higroscópico 2) En las zonas de cotas más elevadas y mayores pendientes Leptosoles.	1) El páramo en su estado natural conserva bien el suelo. No presenta problemas de erosión. 2) Roturado el páramo, la erosión superficial es muy intensa	1) Mientras se mantenga el páramo natural no existen problemas. 2) Si se altera el páramo, su capacidad de regeneración se reduce y puede llegar a ser muy baja.	1) Mantener el páramo en su estado natural. Reforzándolo con una figura de protección legal si resulta necesario. 2) En la actualidad existen roturaciones agrícolas en el páramo, que destruyen su perfil edáfico. Sus efectos son nefastos; pues los suelos una vez roturados sufren una fuerte erosión y pierden su higroscopicidad, anulando al páramo de su función reguladora en el régimen hidrológico de la cuenca. 3) El páramo degradado no es recuperable con la repoblación, pero ésta puede servir de paliativo	Protección
Área dominante > 3000 m Partes bajas del área dominante <3600 m	p>30	Restos del bosque montano siempre verde.	Bosque montano siempre verde	Perfil del suelo variable desde ligero en las cotas más altas, a profundo en las más bajas.	No se detectan donde hay arbolado. Pero donde falta el bosque podrían producirse Deslizamientos superficiales o Erosiones superficiales	Se estima buena	1) Recuperar el bosque montano siempre verde en las superficies que aún se conserva, que son las de mayores pendientes próximos a los arroyos y quebradas. 2) Repoblaciones forestales.	Protección
		Repoblación forestal	Repoblación forestal			Se estima buena	Mantener las repoblaciones, aprovechándolas con criterios de buen uso del agua	Protección

Tabla 5.2. Ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al río Chanchán (provincias de Chimborazo y Cañares, Ecuador)

Altitud	Pendiente p (%)	Cubierta vegetal		Tipo de suelos	Principales problemas de erosión	Capacidad de regeneración bio-climática	Uso del territorio compatible con el objetivo principal de la ordenación agro-hidrológica.	
		Actual	Adecuada				Actuaciones, Recomendaciones	Objetivo
<p>Área dominante > 3000 m</p> <p>Partes bajas del área dominante <3600 m</p>	p>60	Pastizales de temporada (a veces incluso con un riego precario) y en ocasiones con parches de cultivos	Arbolado	Perfil variable de ligero en cotas altas a profundo en las bajas.	1)Deslizamientos superficiales 2) Erosiones superficiales elevadas 3) Pérdida de productividad del suelo.	Se estima buena	1) Únicamente el arbolado puede proteger a estos terrenos de la erosión hídrica, especialmente de los deslizamientos superficiales. 2) La actuación propicia es su transformación en arbolado. 3) Su uso actual sólo se justifica por razones sociales	Protección
	60>p>30	1) Pastizales de temporada (a veces incluso con un riego precario) 2) Pequeñas superficies de cultivos, normalmente para autoconsumo	1) Pastos mientras no aparezcan problemas erosivos graves 2)Arbolado si aparecen problemas	Perfil variable desde medio a profundo	1) Erosiones superficiales elevadas. 2) Pérdida de productividad del suelo. 3) El riesgo de deslizamientos superficiales disminuye pero no desaparece.	Se estima buena	1) Transformar en arbolado 2) Mantener los pastizales, mejorando su conservación, mientras no aparezcan deslizamientos superficiales o graves problemas de erosión. 2 bis) Si aparecen deslizamientos superficiales o graves problemas de erosión transformar en arbolado los pastizales. 3) Su actual situación se justifica por razones sociales.	Protección/ Producción sostenible
	30>p>12	1) Cultivos en general de mercados locales. 2) Pastizales	Agrícola aplicando medidas para conservar el suelo	Profundo	1) Erosiones superficiales elevadas. 2) Pérdida de productividad del suelo.	Se estima buena	1) Aplicar las prácticas de conservación de suelos; lo que exige una previa mentalización 2) Donde se mantienen los pastos, mejorar las técnicas de empleo.	Producción sostenible
	p<12	Cultivos	Agrícola	profundo	Erosión laminar superficial.	Se estima buena	Mantener los cultivos, utilizando medidas para controlar la erosión	Producción
	P<12	Márgenes y riberas	Arbolado	profundo	Tracción de la corriente	Se estima buena	Recuperar la vegetación de márgenes y riberas	Protección

Tabla 5.2. (Continuación 1) Ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al río Chanchán (provincias de Chimborazo y Cañares, Ecuador)

Altitud	Pendiente p (%)	Cubierta vegetal		Tipo de suelos	Principales problemas de erosión	Capacidad de regeneración bio-climática	Uso del territorio compatible con el objetivo principal de la ordenación agro-hidrológica.	
		Actual	Adecuada				Actuaciones, Recomendaciones	Objetivo
Se recuerda que dentro de la cuenca del río Chanchán, existen deslizamientos rotacionales que, aunque no pueden ser abordados con la ordenación agro-hidrológica, tampoco se puede ignorarlos cuando ésta se plantea, pues condicionan el modo de vida de la población que se ve afectada directamente por ellos.								
Área dominada < 3000 m	p>30	Restos del bosque montano siempre verde	Bosque montano siempre verde.	Perfil variable de ligero en las cotas más altas a profundo en las más bajas	Donde falta el arbolado pueden producirse 1)Deslizamientos superficiales o 2)Erosiones superficiales importantes	Se estima buena, pero depende también del grado de conservación del suelo	1) Recuperar el bosque montano siempre verde en las superficies que aún se conserva, que son las de mayores pendientes próximos a los arroyos y quebradas. 2) Repoblaciones forestales.	Protección
		Repoblación forestal.	Repoblación forestal				Mantener las repoblaciones y aprovecharlas	
		Matorrales abandonados	1) Bosque montano siempre verde 2) Repoblación forestal	Perfil variable de ligero en las cotas más altas a profundo en las más bajas	1)Deslizamientos superficiales 2)Erosiones superficiales importantes 3) Pérdida de productividad del suelo.		1) Transformarlo en arbolado (Repoblación forestal) 2) Regular su aprovechamiento conservando una cubierta vegetal todo el año, mientras no aparezcan graves problemas de erosión; si aparecen transformarlo en arbolado (repoblación forestal)	Protección
		Pastizales degradados sobre cultivos abandonados						
	p>30	Pastizales productivos (con rotación de cultivos)	1) Pastizales 2) Agrícola aplicando fuertes medidas para conservar el suelo.	Variable, pero en general suelos profundos	1) Deslizamientos superficiales. 2) Reptaciones. 3) Erosiones superficiales 4) Pérdida de productividad del suelo	Se estima buena	1) Regular el aprovechamiento del pastizal conservando una cubierta vegetal todo el año, mientras no aparezcan graves problemas de erosión 2) Transformarlo en arbolado (repoblación forestal), si aparecen graves problemas de erosión	Protección/ producción sostenible

Tabla 5.2. (Continuación 2) Ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al río Chanchán (provincias de Chimborazo y Cañares, Ecuador)

Altitud	Pendiente p (%)	Cubierta vegetal		Tipo de suelos	Principales problemas de erosión	Capacidad de regeneración bio-climática	Uso del territorio compatible con el objetivo principal de la ordenación agro-hidrológica.	
		Actual	Adecuada				Actuaciones, Recomendaciones	Objetivo
Area dominada < 3000 m	P<30	Pastizales productivos (con rotación de cultivos).	1) Pastizales 2) Agrícola aplicando medidas para conservar el suelo.	Profundos	1) Reptaciones 2) Erosión superficial: laminar; surcos 3) Pérdida de productividad del suelo.	Se estima buena	1) Mantener los pastizales mejorando las técnicas de manejo 2) En los cultivos rotacionales, aplicar prácticas de conservación de suelos. 3) Controlar los sistemas de riego	Producción sostenible
	30>p>12	Cultivos	Agrícola aplicando medidas para conservar el suelo.	Profundos	1) Erosiones superficiales y en ocasiones profundas 2) Pérdida de productividad del suelo	Se estima buena	Mantener los cultivos, aplicando las prácticas de conservación de suelos y regulando las técnicas de riego.	Producción sostenible
	p<12	Cultivos	Agrícola	profundos	Erosión laminar superficial	Se estima buena	1) Mantener los cultivos, adoptando medidas para controlar la erosión laminar y en regueros y regulando las técnicas de riego.	Producción
	p<12	Márgenes y riberas de los cauces	Arbolado		Tracción de la corriente.	Se estima buena	1) Mantener la vegetación de márgenes y riberas y, en el caso de que no existiera, crearlas 2) No constreñir las secciones de evacuación de la corriente	Protección

Tabla 5.2. (Continuación 3) Ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al río Chanchán (provincias de Chimborazo y Cañares, Ecuador)

5.2.4. Breve descripción del estado físico de la cuenca vertiente al río Guabalcón.

El río Guabalcón es afluente al río Chanchán. Su cuenca vertiente se ubica en la Sierra Occidental de la región Andina del centro del Ecuador, y está comprendida entre las coordenadas geográficas UTM zona 17S siguientes: 728331, 9749477 N; 734230, 9734487 S; 725834, 9741798 O y 735237, 9735495 E. Tiene una superficie de 65,83 Km² y un perímetro de 41,85 km. Su altitud máxima es de 4.420 m y su cota más baja de 1.370 m. Presenta un relieve accidentado, con una pendiente media de la cuenca de 56 % (las tierras planas dentro de la cuenca se reducen al 4% de su superficie y las onduladas hasta el 25 % de gradiente ocupan un 18 % del área total). Su morfología es ovalada-alargada con un índice de compacidad 1,44. Administrativamente pertenece al cantón de Chunchi en la provincia de Chimborazo y abarca las parroquias Compud y Llagos.

El río Guabalcón presenta las características típicas de un curso torrencial de montaña, con un recorrido de 18,5 Km, una pendiente media del 16 % y un tiempo de concentración aproximado de 3 horas. Exhibe una fuerte erosión lineal en su cauce y en sus márgenes, aspecto que se extiende también por los restantes cursos de la red de drenaje de la cuenca.

Su geología, cuyo contenido se ha extraído del mapa geológico del Ecuador, muestra que el 64 % de la cuenca pertenece al periodo comprendido entre el Eoceno medio tardío y el Mioceno y sus materiales están constituidos por areniscas tobáceas y en cantidades menores por limonitas, brechas detríticas y tobas, aunque en la cabecera de la cuenca también afloran algunas rocas intrusivas que datan del Cretácico. El 36 % restante corresponde a minerales del Cuaternario muy probablemente del Holoceno, que se presentan a modo de derrumbes y deslizamientos en masa con grava y arena sueltas, o bien en terrazas y en depósitos aluviales y coluviales.

Desde el punto de vista edafológico, se distinguen tres grupos de suelos que se corresponden con distintos pisos de altitud. En las cotas superiores de la cabecera de la cuenca predominan los Andosoles, que en las zonas más planas y con mayor humedad pueden derivar en Hístosoles (suelos encharcados ocupan un porcentaje muy bajo, 0,3 %). A cotas inferiores hasta los 2.800 m dominan aún los Andosoles, siendo éstos Umbricos donde el relieve permite una acumulación de ceniza libre de procesos erosivos, mientras que en las zonas escarpadas se trata de Leptosoles con características Ándicas pero poco profundos. Resumiendo los Andosoles representan el 9% de la superficie de la cuenca, incluyendo el 0,3% de los Hístosoles.

En la parte intermedia de la cuenca se presentan suelos de francos a arcillosos, con alta saturación de bases y un contenido de materia orgánica superior al 3 %; estas características permiten calificarlos dentro del grupo de los Phaeozems, con una variabilidad hacia Cámbisoles Eútricos y Vérticos en las zonas más planas, mientras que en las mas escarpadas aparecen suelos muy superficiales del grupo de los Leptosoles. El área ocupada por los Cámbisoles representa un 50 % de la cuenca, lo que es predecible pues su zona intermedia es geológicamente inestable y los materiales están mezclados, además es la que recibe la mayor presión antrópica por ser la más poblada.

En el piso inferior de la cuenca se pueden apreciar suelos coluviales en terrazas, que constituyen Cambisoles Eutricos, aunque en algunos casos la presencia de arcillas activas les proporciona características vérticas a dichos suelos. Sin embargo, la mayor parte de este piso inferior esta cubierto por suelos superficiales sobre lavas andesíticas, que se pueden incluir

dentro de los Leptosoles. La superficie ocupada por el grupo de los Leptosoles dentro de la cuenca representa el 41 % de la misma.

En cuanto al clima, se estima un módulo pluviométrico del orden de 700 mm en las zonas media y baja de la cuenca, que se eleva ligeramente por encima de los 1.000 mm en las áreas de cotas superiores a los 2.800 m, siendo una característica destacada del clima sus marcados periodos estacionales de lluvias y de sequía; esta última obliga a regar los pastos y cultivos durante la misma, para poder mantener la producción agropecuaria de la cuenca. La temperatura promedio en el área central de la cuenca, donde se concentra la mayor producción agropecuaria, es de 15 °C, las máximas están alrededor de los 27°C y las mínimas en los 11 °C. La humedad relativa registra los siguientes valores: la máxima del 100%, la mínima es del orden del 40 % y en promedio se mantiene en un 90 %. La radiación solar es de 164 Watts/m² promedio anual

En cuanto a los usos del suelo en la cuenca se diferencian cinco tipos, conforme se desplaza desde las zonas de cotas más elevadas en el sur hasta las más bajas en el norte. Son los siguientes: 1) *Vegetación de pajonal típica del páramo* en las planicies de cotas más altas y deshabitadas del sur por encima de los 3.600 m de altitud, representa el 14,8 % de la superficie de la cuenca. 2) *Vegetación de chaparros y pajonal*, que se sitúa en la zona inmediatamente inferior pero por encima de los 2.800 m de cota, predominando el chaparral en las áreas menos elevadas, cubre un 17,2 % de la cuenca vertiente. 3) *Pastizal-chaparros*, los pastizales se dedican a la producción de leche, son irrigados y alternan con zonas de chaparros, ambos se ubican en terrazas coluviales y laderas escarpadas, ocupan 42,2 % del área de la cuenca y se ubican en sus cotas centrales por encima de los 2.000 m de altitud. 4) *Cultivos y pastos*, en el valle de Piñancay y sus alrededores, al sureste de la cuenca y ocupando un 18,6 % de la misma, se trata de un paraje agrícola y ganadero entre cuyos cultivos predominan los de ciclo corto, como la rotación de maíz, fréjol, pepino (dulce), etc., la zona en cuestión presenta un drenaje pobre. Además dentro de este mismo paraje y lindando con la divisoria de la cuenca hay una zona de laderas inestables de fuertes pendientes, que presentan riesgo de deslizamientos y derrumbes. 5) *Maleza cultivos*, se encuentra en la zona más baja de la cuenca de la que solo representa el 7,2 % de su superficie, lo forma un cañón profundo con abismos impresionantes, donde se aprecian algunas terrazas aprovechadas por los pobladores para la agricultura bajo riego, pero la mayor parte de esta zona corresponde a tierras inaprovechables, dominadas por una cobertura de especies arbustivas y herbáceas propias de climas semiáridos. Atendiendo a la cuenca en su conjunto, no existen acciones importantes de conservación de suelos (o éstas se limitan a mantener el riego donde se practica), de forestación o de reforestación. Son muy escasos los lugares donde se han efectuado plantaciones con especies naturales de la zona, y menos aún con otras especies.

5.2.5. Enfoque principal de la ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al río Guabalcón.

El objetivo principal de la ordenación agro-hidrológica de la cuenca en cuestión es mantener, tratando de mejorar sus condiciones, a la población que vive en ella utilizando sus recursos naturales, especialmente el agua y suelo; asegurando la conservación de éstos a largo plazo y tomando medidas para que ante eventos torrenciales extraordinarios dichos recursos ni se degraden, ni se conviertan en elementos de riesgo para la población. Es decir, el aprovechamiento sustentable de la cuenca y la adopción de medidas para disminuir los riesgos a la población ante el desencadenamiento en la cuenca de procesos geo-torrenciales, causados por la aparición en ella de eventos torrenciales extraordinarios.

En la cuenca del río Guabalcón existen cinco tipos de usos del suelo y es en relación con los mismos, como se plantea su ordenación agro-hidrológica.

En la cabecera de la cuenca se presentan los dos primeros tipos de usos: 1) *Vegetación de pajonal típica del páramo* a partir de los 3.600 m de altitud y 2) *Vegetación de chaparro y pajonal* por encima de los 2.800 m de altitud. Entre ambos usos cubren las zonas más elevadas del área dominada de la cuenca y que necesitan una mayor protección ante el geodinamismo torrencial, por tratarse de las superficies que por su posición altimétrica son las más vulnerables y además sus efectos perjudiciales, en el caso de desencadenarse los fenómenos geo-torrenciales en dicha zona, se transmiten aguas abajo por toda la cuenca, incrementando con ello los riesgos en las áreas dominadas. En estas superficies la vegetación debe cubrir de forma permanente el suelo. En el caso de esta cuenca, tanto el *pajonal* en sus cotas más elevadas, como el *chaparro* en las más bajas, realizan la función protectora que se necesita en la superficie en cuestión. La ordenación propone la conservación y mantenimiento de ambos usos del suelo y su justificación se ha explicado exhaustivamente al comentar los mismos en el epígrafe anterior 5.2.2. Además, al tratarse de un área prácticamente deshabitada, resulta viable mantener la vegetación natural en la misma.

Siguiendo con el área dominante de la cuenca, entre las cotas 2.000-2.800 m el uso del suelo es del tipo 3) *Pastizal-chaparro*. Se trata de una zona poblada donde se utilizan los recursos agua y suelo disponibles. La cuestión radica en no degradarlos para poder seguir utilizándolos en el futuro y el problema principal se encuentra en proteger los suelos existentes ante los fenómenos de erosión hídrica graves, que podrían convertirlo en inservibles; para ello se propone aprovechar las oportunidades que ofrece la topografía localizada del terreno, reforzándolas con técnicas de conservación de suelos, dentro de la zona en cuestión en la que la pendiente media de sus laderas resulta elevada para aplicar unos aprovechamientos (cultivos y pastizales) extensivos. Con este propósito se ha efectuado una adaptación de la *Clasificación Agrológica de Suelos* a la cuenca del río Guabaldón, para aplicarla en este uso del suelo tipificado como 3; así como en los tipos de suelos 4 y 5 que se ubican aguas abajo, en el área dominada de la cuenca. Dicha clasificación se sintetiza en la matriz de la Tabla 5.3 adjunta.

Pendiente del terreno (%)	Clases edafológicas de suelos			
	Andosoles	Histosoles	Cambisoles	Leptosoles
<12	A ₁	F ₃	A ₁	A ₃
12<p<24	A ₂	F ₃	A ₂	A ₃
24<p<30	A ₃	F ₃	A ₃	F ₁
30<p<60	F ₁	F ₃	F ₁	F ₂
>60	F ₂	F ₃	F ₂	F ₂

Tabla 5.3. Adaptación de la *Clasificación Agrológica de Suelos* para la cuenca vertiente del río Guabaldón (situada en alta montaña de la región Andina del centro del Ecuador)

Los símbolos que aparecen en la matriz de la Tabla 5.3 representan:

- A₁** Suelos agrícolas, profundos, que pueden cultivarse con sólo aplicar en ellos las buenas prácticas de labranza, medidas de conservación de suelos y control del riego, la pendiente del terreno no supera el 12 %. Se corresponde con la Clase II de la Tabla 2.1 y excepcionalmente con la Clase I.

- A₂** Suelos agrícolas, que requieren prácticas de conservación de suelos, además de todas las labores culturales de la clase precedente; la pendiente del terreno no supera el 24 % y su perfil es de medio a profundo. Se corresponde con la Clase III de la Tabla 2.1 y en situaciones extremas con la Clase IV.
- A₃** Suelos que requieren importantes trabajos de sistematización del terreno (abancalados) para poder conservarlos, además de todas las labores culturales anteriormente definidas para las clases precedentes. Se corresponde con la Clase IV de la Tabla 2.1. Estos suelos son más aptos para utilizarlos como pastizales permanentes, aplicando medidas para su buena conservación.
- F₁** Suelos no aptos para la agricultura, por la elevada pendiente del terreno y por tener un perfil entre medio y poco profundo. Necesitan de una cubierta vegetal permanente; pero se pueden utilizar como pastizales, adoptando severas medidas de conservación, mientras no se manifiesten en ellos problemas serios de erosión hídrica, que pongan en peligro su futuro como suelos productivos. Se corresponde con la Clase IV de la Tabla 2.1 y con las situaciones menos favorables de la Clase VI.
- F₂** Suelos típicamente forestales que necesitan de una cubierta arbolada permanente para su conservación, por ser poco profundos y presentar sus terrenos elevadas pendientes. Se corresponde con la Clase VII de la Tabla 2.1.
- F₃** Suelos no productivos, en el caso de la cuenca que nos ocupa son suelos que se encharcan, pero que pueden tener una cubierta vegetal que los protege. Se corresponde con la Clase V de la Tabla 2.1.

Lo que se propone en la ordenación agro-hidrológica de esta cuenca para el uso del suelo tipo 3, es aplicar en la misma el contenido expuesto en la Tabla 5.3. Esto implica un trabajo laborioso, pero es la única forma de compaginar el aprovechamiento de los recursos con su mantenimiento a largo plazo. Si la situación de esta cuenca se degradara, se podría llegar a la situación de que la zona que se comenta necesitase una repoblación generalizada para su recuperación, pero por el momento resulta suficiente con control de las superficies ocupadas por los suelos F₂. mediante cubiertas arboladas y las F₁ A₃ y A₂ con las prácticas de conservación pertinentes.

Para el uso del suelo tipo 4) *Cultivos y pastos*, se propone seguir utilizando el contenido de la Tabla 5.3 como norma a aplicar en la ordenación agro-hidrológica. Agronómicamente podría parecer que se trata de una continuidad del tipo anterior, pero tiene diferencias importantes con él, porque es un paraje más seco, con peor drenaje y con una pendiente media menor. Desde el punto de vista geo-torrencial se corresponde con la zona dominada (de ello se comenta más adelante).

En este espacio ocupado por el uso del suelo tipo 4, hay un paraje ubicado al noreste del mismo, de una extensión importante, en el que las laderas que definen el linde de la cuenca y sus terrenos próximos presentan riesgos evidentes de deslizamientos. En la ordenación agro-hidrológica se contempla que toda esta zona, ampliada hasta donde es previsible que puedan alcanzar dichos deslizamientos en caso de producirse, no se destine a ninguna actividad productiva y, por supuesto, se impida cualquier asentamiento, manteniéndose su vegetación natural.

El uso del suelo tipo 5) *Maleza y cultivos* representa la continuidad del tipo anterior, pero las condiciones xerofíticas en el mismo se acentúan y sus pendientes son más empinadas. En él las clases predominantes son la F₂ y en menor medida las A₂ y A₃. Respecto a estas últimas se recomienda extremar las medidas de conservación y en cuanto a la clase F₂, podría ser

interesante utilizar una especie forestal xerófila que tuviera algún aprovechamiento, en todo caso es conveniente que las laderas en cuestión estén cubiertas, aunque sólo sea de vegetación natural.

En cuanto a la necesidad de protección de la cuenca del río Guabalcón ante los efectos geotórrenciales que le puedan causar las precipitaciones extraordinarias que ocurran en ella, se resalta que la morfología y el relieve de esta cuenca le confieren unas características típicas de una cuenca tórrencial de montaña, a lo que contribuye también la propia morfología del cauce principal y sus afluentes (de pendientes elevadas y con muestras de erosión en sus lechos y en sus márgenes). En la cuenca en cuestión, *su área de recepción* (también llamada cuenca de recepción) y su *garganta* están bien definidas, mientras que su *cono de sedimentación* no es apreciable para las acusadas características tórrenciales que presenta el río en cuestión, lo que puede ser debido a que el río Guabalcón tiene una pendiente elevada, que le facilita el transporte de su carga sólida durante las avenidas hasta su confluencia en el río Chanchán, que a su vez durante las avenidas tiene capacidad suficiente para incorporar el caudal líquido y sólido del río Guabalcón a su propia corriente y transportarlo aguas abajo.

El *área de recepción* de la cuenca del río Guabaldón comprende prácticamente el 75 % de la misma e incluye los usos del suelo tipos 1, 2 y 3. Es una gran superficie, con una pendiente elevada (> 56 %) y un desnivel importante (2.420 m), por lo que necesita de una adecuada cubierta vegetal protectora, especialmente en su cabecera, para que ante precipitaciones tórrenciales extraordinarias no se genere una erosión hídrica acelerada, que desnude sus laderas y aporte una gran carga de sedimentos a sus cursos de drenaje.

La *garganta* corresponde a los 4 km. finales del río Guabalcón. En ella la pendiente del río sigue siendo elevada y se detectan fuertes erosiones tanto de fondo como en los márgenes del cauce, donde aparecen repetidas veces conchas de erosión (deslizamientos superficiales en los propios márgenes, debido a la abrasión de la corriente en su base). Cualquier paso (puente-badén, puente convencional) que se realice sobre el río, necesita de una cimentación importante, porque la tracción de la corriente durante las avenidas se estima muy elevada. Se podría plantear la posibilidad de construir un dique rastrillo, cerrando el tramo final del río, que además de retener la erosión remontante, permitiera servir de apoyo a un puente para cruzar el río en esta zona, donde existe un camino de acceso a la zona baja de la cuenca.

Aunque el río Guabalcón es muy tórrencial, lo mismo que sus afluentes, la cubierta vegetal que dispone su cuenca vertiente en sus tramos superiores (sobre todo en los de cabecera) hace que salvo ante eventos tórrenciales extremos (caso el fenómeno del Niño) no se muestren problemas graves de erosión en dichos tramos, aunque aparezcan en los tramos de garganta como se ha comentado. Sería conveniente un estudio del comportamiento geo-tórrencial de este río para eventos tórrenciales de diferentes períodos de recurrencia, porque permitiría conocerlo mejor ante la necesidad de una corrección posterior de algún tramo del mismo y porque estos cursos tienen secciones de toma de agua para los riegos, que es conveniente conocerlos en el contexto de su funcionamiento ante eventos geo-tórrenciales.

5.2.6. Tabla de la ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al río Guabalcón

En la Tabla 5.4 se han utilizado los mismos términos de *protección*, *producción sostenible* y *producción* empleados en las tablas anteriores, para asignar los objetivos de la ordenación agro-hidrológica a los diferentes espacios de la cuenca del río Guabalcón y también se ha asumido la misma filosofía para interpretarlos.

Altitud	Pendiente p (%)	Cubierta vegetal		Tipo de suelos	Principales problemas de erosión	Capacidad de regeneración bio-climática	Uso del territorio compatible con el objetivo principal de la ordenación agro-hidrológica.	
		Actual	Adecuada				Actuaciones, Recomendaciones	Objetivo
<p>Área dominante > 2000 m</p> <p>Partes altas del área dominante >3600 m</p>	p>30 (en la cumbre hay zonas con pendientes moderadas e incluso llanas de p<12 %, como los Hístosoles)	Vegetación típica de páramo: <i>pajonal</i> (representa el 14,8 % del área de la cuenca).	Vegetación típica de páramo: <i>pajonal</i> .	Andosoles (En las zonas más planas y húmedas Hístosoles; pero sólo supone el 0,3 % de la cuenca)	1) El páramo en su estado natural conserva bien el suelo. Sin problemas de erosión y con excelentes condiciones hidrológicas.	Muy buena mientras se conserve la vegetación de <i>pajonal</i> , típica del páramo. Si desaparece el <i>pajonal</i> la capacidad de regeneración del área se reduce y puede llegar a ser muy baja.	1) Mantener el páramo en su estado actual. Reforzándolo con una figura de protección legal si resulta necesario. 1.bis) En la actualidad el páramo de altura de esta cuenca se conserva y se recomienda que continúe existiendo	Protección
<p>Área dominante > 2000 m</p> <p>Partes altas del área dominante > 2800 m y <3600 m</p>	p>60	Vegetación de <i>chaparro</i> y <i>pajonal</i> . (representa el 17,2 % del área de la cuenca).	Vegetación de <i>chaparro</i> y <i>pajonal</i> .	Andosoles (Úmbricos en los relieves más suaves; Leptosoles ándicos en los relieves escarpados)	No se detectan, aunque es una área muy vulnerable a la erosión. El <i>pajonal</i> protege en las zonas de mayor cota y el <i>chaparro</i> en las cotas más bajas.	Muy buena mientras se mantenga la vegetación de <i>chaparro</i> y <i>pajonal</i>	1) Mantener la vegetación de <i>pajonal</i> en las cotas más elevadas y la de <i>chaparro</i> en las más bajas, procurando que no se degrade. Su función es esencial para conservar la productividad agropecuaria del resto de la cuenca.	Protección
Área dominante	p>10	Vegetación de riberas y márgenes	Arbolado	Depósitos coluviales	Erosión por tracción de la corriente.	Se estima buena	Mantener la vegetación de márgenes y riberas y, en el caso de que no existiera, crearlas	Protección

Tabla 5.4. Ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al río Guabalcón, afluente del río Chanchán, (Ecuador)

Altitud	Pendiente p (%)	Cubierta vegetal		Tipo de suelos	Principales problemas de erosión	Capacidad de regeneración bio-climática	Uso del territorio compatible con el objetivo principal de la ordenación agro-hidrológica.	
		Actual	Adecuada				Actuaciones, Recomendaciones	Objetivo
Área dominante > 2000 m y <2800 m (zona central de la cuenca)	p>60	Vegetación de <i>Pastizal - chaparro</i> (representa el 42,2 % del área de la cuenca).	Mantener el <i>chaparro</i> cubriendo bien al suelo y en buen estado.	Phaeozems variando hacia Cámbisoles Eútricos y Vérticos en las zonas más planas	Pueden ocurrir: 1) Deslizamientos superficiales 2) Reptaciones 3) Barranqueras y cárcavas 4) Erosión superficial generalizada.	Se estima buena	1) Mantener la vegetación de chaparro para evitar deslizamientos superficiales o problemas graves de erosión del suelo 2) Repoblación forestal, si fuera necesario para evitar graves problemas por erosión del suelo.	Protección
	60>p>30		Mantener el <i>pastizal</i> mientras no aparezcan procesos erosivos; en caso contrario invadirlo con el <i>chaparro</i> .	Leptosoles en las áreas más escarpadas y con menor profundidad	Pueden ocurrir: 1) Deslizamientos superficiales 2) Reptaciones 3) Regueros y cárcavas 4) Erosión superficial generalizada		1) Mantener los pastizales, mejorando su conservación, mientras no aparezcan deslizamientos superficiales o graves problemas de erosión. 2) Si aparecen deslizamientos superficiales o graves problemas de erosión: <i>a)</i> transformar los pastizales en chaparral o <i>b)</i> recurrir a la repoblación forestal.	Protección/ Producción sostenible
	P<30		<i>Pastizal</i> o mantener lo que exista: <i>Pastizal - chaparro</i>		Pueden ocurrir: 1) Reptaciones 3) Regueros y cárcavas 4) Erosión superficial generalizada		1) Pastizales bien conservados 2) Mantener la vegetación que exista siempre que se encuentre en buen estado y cubra el suelo	Producción
Área dominante	p>10	Riberas y márgenes	Arbolado	Depósitos coluviales	Erosión por tracción de la corriente.	Se estima buena	Mantener la vegetación de márgenes y riberas y, en el caso de que no existiera, crearlas	Protección

Tabla 5.4. (Continuación 1) Ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al río Guabalcón, afluente del río Chanchán, (Ecuador)

Altitud	Pendiente p (%)	Cubierta vegetal		Tipo de suelos	Principales problemas de erosión	Capacidad de regeneración bio-climática	Uso del territorio compatible con el objetivo principal de la ordenación agro-hidrológica.			
		Actual	Adecuada				Actuaciones, Recomendaciones	Objetivo		
Area dominada < 2000 m	p>30	Zona con riesgo grave de deslizamientos. Vegetación natural de pastos y matorral		Suelos deslizantes	Deslizamientos rotacionales	No procede plantearlo	Tratar de evaluar la superficie que podrían ocupar los posibles deslizamientos, para aislarlo de cualquier actividad	Protección		
	p>30	Vegetación de <i>Cultivos y pastos</i> (representa el 18,6 % del área de la cuenca, contando con la zona deslizante).	1) Pastos bien conservados, si se controla la erosión 2) Arbolado	Leptosoles, Cambisoles eútricos	1) Reptaciones 2) Regueros y cárcavas 3) Erosión superficial generalizada	Se estima buena.	1) Mantener los pastos, mejorando su conservación, mientras no aparezcan deslizamientos superficiales o graves problemas de erosión; si aparecen repoblación forestal	Protección/ Producción sostenible		
	30>p>24		Cultivos con prácticas de conservación de suelos pertinentes						Cambisoles eútricos (a veces vérticos)	1) Regueros y cárcavas 2) Erosión superficial
	24>p>12			Cultivos	Erosión laminar					
	P<12									
	p>30		Vegetación. <i>Maleza cultivos</i> (representa el 7,2 % del área de la cuenca).	Vegetación arbolada xerófila.	Leptosoles	Posibles deslizamientos y erosión generalizada	Se estima de buena a regular para las zonas más xerófilas.	1) Repoblación forestal con especies xerofíticas 2) Conservar y mejorar la vegetación natural existente.	Protección	
	30>p>12			1) Arbolado xerófilo. 2) Mantener las terrazas, si se controla la erosión.	Cambisoles	1) Regueros y cárcavas 2) Erosión superficial generalizada		1) Mantener las terrazas cultivadas, extremando las prácticas de conservación 2) Conservar y mejorar la vegetación natural o repoblación xerófila en el resto	Protección/ Producción sostenible	

Tabla 5.4. (Continuación 2) Ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al río Guabalcón, afluente del río Chanchán, (Ecuador)

Altitud	Pendiente p (%)	Cubierta vegetal		Tipo de suelos	Principales problemas de erosión	Capacidad de regeneración bio-climática	Uso del territorio compatible con el objetivo principal de la ordenación agro-hidrológica.	
		Actual	Adecuada				Actuaciones, Recomendaciones	Objetivo
Área dominada < 2000 m	P<12	<i>Maleza cultivos</i>	Cultivos	Aluvial o coluvial	Erosión laminar	Se estima de buena a regular	Mantener los cultivos, con medidas de conservación	Producción
	P<12	Riberas y márgenes	Arbolado	Depósitos coluviales	Tracción de la corriente y conchas de erosión en los márgenes	Se estima de buena a regular	1) Proteger el lecho y márgenes del río Guabalcón con obras hidráulicas para controlar la erosión lineal por tracción de la corriente. 2) Mantener la vegetación de márgenes y riberas y, en el caso de que no existiera, crearlas.	Protección

Tabla 5.4. (Continuación 3) Ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al río Guabalcón, afluente del río Chanchán, (Ecuador)

5.3. ORDENACIÓN AGRO-HIDROLÓGICA DE LA CUENCA VERTIENTE AL ARROYO DE BUENA ESPERANZA (TIERRA DEL FUEGO, ARGENTINA)

5.3.1. Breve descripción del estado físico de la cuenca vertiente al arroyo de Buena Esperanza.

El arroyo de Buena Esperanza discurre desde la cordillera Fueguina hasta el Canal Beagle al que vierte sus aguas, aunque en este texto se describe el estado físico de su cuenca vertiente desde su nacimiento hasta la cota de 114 m. Dicha cuenca está comprendida entre las coordenadas geográficas 68° 19' 06'' y 68° 25' 00'' de longitud oeste y 54° 46' 28'' y 54° 49' 12'' de latitud sur, su cota máxima es de 1.266 m, tiene una superficie de 14,6 Km² y presenta una orografía accidentada, pero que la protege de la exposición del viento, de manera que las calmas son más frecuentes en ella que en las restantes zonas de la Isla; su morfología es rectangular-oblonga y su red de drenaje bien definida. Considerada la cuenca del arroyo de Buena Esperanza en su conjunto, en distinguen en ella tres zonas: una zona alta de características glaciario-marital; una zona media turística donde se encuentra el límite de la expansión de la ciudad de Ushuaia (ambas se corresponden con el área dominante de la cuenca y su estado físico se describe en este texto) y una zona más baja que forma parte del área urbana de la propia ciudad y que pertenece al área dominada de la cuenca.

El clima es un factor determinante en esta cuenca, la temperatura media anual a nivel del mar es de 5,5° C, decreciendo hacia el interior con el gradiente altitudinal e incrementándose su intervalo diario y estacional. La precipitación anual en la costa del Beagle es de 520 mm, que se incrementa por el efecto orográfico desde el Canal Beagle hacia las cumbres interiores, donde alcanza los 1.300 mm en las cabeceras.

Sus suelos son en general poco profundos y su desarrollo disminuye conforme se eleva en altitud.

La vegetación predominante es el bosque mesófilo con tres variedades (Roig, 1998): las caducifolias *Nothofagus pumilio* (lenga) y *Nothofagus antártica* (ñire) y en las zonas más altas la perennifolia *Nothofagus betuloides* (guindo o coihue de Magallanes). El límite superior del bosque se encuentra a 600 m, pudiendo variar en ± 100 m en función de la exposición al sol de la ladera y de la cercanía del mar, que atenúa las oscilaciones térmicas (Puigdefabregas *et al*, 1988). Las turberas de *Sphagnum* se presentan en el umbral de la morena, situado entre 250-300 m.

El régimen hidrológico, condicionado por el clima, es glacionival. El escurrimiento está regulado por la nieve estacional, los almacenamientos en el detrito de cordillera y los aportes de glaciares. Las nacientes alcanzan los 1.400 m, presentando pequeños glaciares que contribuyen al escurrimiento. Las turberas constituyen otro componente con gran capacidad de retención de humedad. El arroyo de Buena Esperanza tiene un módulo de 300 l/s. Las aguas de la cuenca son hiposalinas, ligeramente bicarbonatadas y de gran transparencia. El pH fluctúa alrededor de 7 y el contenido de Fe es moderadamente alto. Sin embargo, en los tramos medio y bajo de la cuenca existen inicios de contaminación por la presencia de colifecales.

La cuenca del arroyo de Buena Esperanza abastece de agua potable a su capital Ushuaia, situada en su área dominada (aunque no es la única fuente de suministro de agua a la ciudad). La presencia de la ciudad de Ushuaia le imprime una importante afección humana y un fuerte impacto urbanístico-turístico, que incide en el uso del suelo en el tramo medio y bajo de la misma, que por sus características fisiográficas y climáticas, resulta muy vulnerable a cualquier alteración antrópica.

5.3.2. Enfoque principal de la ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al arroyo de Buena Esperanza.

El objetivo principal de la ordenación de esta cuenca es la protección de las personas que habitan en su área dominada, así como de sus bienes, ante los efectos del geo-dinamismo torrencial que se puede desencadenar en el arroyo de Buena Esperanza, como consecuencia de que tenga lugar en su cuenca vertiente un evento torrencial extraordinario o una repentina fusión del manto de nieve.

Los otros objetivos de la ordenación, irrenunciablemente unidos al anterior porque utilizan elementos comunes para elaborarla, son el aprovechamiento racional y sostenido de los recursos hídricos de la cuenca y el mantenimiento de su ecosistema. Este último representa un valor añadido para la ciudad de Ushuaia, conjuntamente con su ubicación geográfica y su geomorfología, y todos ellos le aportan un patrimonio natural de gran valor estético a la ciudad, que supone un importante aval para su desarrollo turístico.

Los objetivos citados implican una ordenación del uso del territorio, que haga compatible su desarrollo económico, con la conservación de los elementos naturales de la cuenca, esenciales para su protección ante la aparición en ella de eventos geo-torrenciales y para el aprovechamiento sostenible de sus recursos hídricos. El principal de estos elementos es el bosque de *Nothofagus* situado en el zona media de la cuenca, pero también se incluyen las turberas y los almacenamientos de detritus de cordillera. Todos ellos intervienen en los ciclos del agua y de los sedimentos dentro de la cuenca en cuestión, moderando sus efectos ante los eventos torrenciales y regulando su régimen hídrico, lo que contribuye al correcto funcionamiento del ecosistema de la cuenca. Al respecto, conviene tener presente la fragilidad del sistema agua-suelo-vegetación existente en la misma, ante cualquier elemento que pueda vulnerarlo, a causa especialmente del clima subantártico frío, húmedo y sin estación seca del área en cuestión, que dificulta su recuperación.

El efecto que ejerce el mencionado bosque de *Nothofagus* en el equilibrio hidrológico y ecológico y en la estabilidad del suelo en la cuenca del arroyo de Buena Esperanza es muy importante; pero lo es más la protección que le proporciona a la ciudad de Ushuaia situada aguas abajo, ante la aparición en dicha cuenca de eventos torrenciales extraordinarios o de una súbita fusión de su manto de nieve, que desencadenen un proceso geo-torrencial en el arroyo, que termine aterrando de sedimentos su área dominada, donde se encuentra la expansión de la ciudad.

También conviene considerar el elevado coste que supondría una infraestructura (en su ejecución y posterior mantenimiento) que ejerciera las mismas funciones y los mismos efectos beneficiosos para la ciudad de Ushuaia que el citado bosque de *Nothofagus*. Además aunque, ante un evento torrencial extremo, el bosque no consiga reducir por completo los efectos geo-

torrenciales en el arroyo de Buena Esperanza, algo que resulta lógico; éstos serían menores que si la cuenca estuviera desarbolada. A esto hay que añadir que para multitud de eventos torrenciales ordinarios, el bosque de *Nothofagus* resulta totalmente eficiente para controlar el geo-dinamismo torrencial en el arroyo de Buena Esperanza; ello supone evitar gastos en reparaciones y mantenimiento del cauce del arroyo tras los mismos. La situación expuesta resulta similar a la que se plantea en muchas cuencas de montaña europeas con intereses turísticos en sus áreas dominadas, como las situadas en los Alpes, en las que se asume la importancia de los bosques de cabecera de una cuenca en la regulación de los fenómenos geotorrenciales que puedan desencadenarse en sus cursos de drenaje, cuyos efectos se dejan sentir en las áreas dominadas.

Por las razones indicadas y por la intensa presión urbanística que incide actualmente sobre la ciudad de Ushuaia, la ordenación agro-hidrológica de la cuenca del arroyo de Buena Esperanza resulta de especial urgencia e interés.

La cuenca se consideran representativa de las principales actividades antrópicas existentes en la zona sur de la Provincia de Tierra de Fuego y en las demás cuencas Andino-Patagónicas; por lo que las conclusiones que puedan derivarse de su ordenación agro-hidrológica, podrían extenderse un área superior a la estrictamente ocupada por ella.

5.3.3. Tabla de la ordenación agro-hidrológica de la cuenca vertiente al arroyo de Buena Esperanza

En la Tabla 5.5 muestra la ordenación agro-hidrológica de la cuenca del arroyo de Buena Esperanza, en ella, a diferencia de las tablas anteriores, el único objetivo en todas las áreas de la cuenca es el de *protección*. En realidad se trata de adecuar los usos de la cuenca a la protección de la ciudad de Ushuaia, situada en su área dominada, ante cualquier tipo de fenómeno geo-torrencial que pueda producirse en el arroyo de Buena Esperanza, por causa de un evento torrencial o, una repentina fusión del manto de nieve, que tenga lugar en su cuenca.

Reconocimiento

La redacción de este capítulo ha sido posible gracias a la colaboración de las personas e instituciones que a continuación se mencionan, que han facilitado la información sobre el estado físico de las cuencas analizadas y ordenadas. Para la cuenca vertiente al río Pejibaye: **Miriam Miranda; Jorge Fallas y Carmen Valverde, CINPE, Fundación Universidad Nacional de Costa Rica, Heredia (Costa Rica)**. Para las cuencas vertientes al río Chanchán y al río Guabalcón: **Felipe Cisneros; Pedro Cisneros y Bert De Bièvre, PROMAS, Universidad de Cuenca (Ecuador)**. Para la cuenca del arroyo de Buena Esperanza en Ushuaia: **Adriana Urciuolo; Rodolfo Iturraspe y Leonardo Collado, Subsecretaría de Recursos Naturales (Dirección de Recursos Hídricos), Provincia de Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur (Argentina)**.

Altitud	Pendiente p (%)	Cubierta vegetal		Tipo de suelos	Principales problemas de erosión	Capacidad de regeneración bio-climática	Uso del territorio compatible con el objetivo principal de la ordenación agro-hidroológica.	
		Actual	Adecuada				Actuaciones	Objetivo
Área dominante > 600 m (zona alta o de cumbres)	p > 60	No existe vegetación (glaciar y canchales)	La que pueda existir de forma natural	Litosuelos	Posibles: 1) Deslizamientos superficiales; 2) Caída de rocas	Nula o muy escasa	1) Mantener el territorio en su estado natural. 2) Si hubiera aludes que presentaran peligro; Medidas para sujeción del manto de nieve	Protección
		1) Pastizal ralo de montaña; 2) Arbolado achaparrado	Mantener la vegetación existente.	Someros	Posibles: 1) Deslizamientos superficiales 2) Erosiones superficiales	Muy escasa	Mantener la vegetación natural existente	Protección
Área dominante < 600 m y > 114 m (zona media)	p > 30	1) Bosque natural 2) En las cotas más altas parte del arbolado se encuentra achaparrado	Mantener la vegetación existente.	Someros	1) En las zonas de bosque no hay erosión 2) Donde no hay bosque posibles: a) Deslizamientos superficiales b) Erosiones superficiales	Se estima media	1) Mantener el bosque natural y toda la vegetación natural existente. 2) Controlar la erosión del cauce y el transporte sólido de fondo en el arroyo, para que no afecte a las infraestructuras.	Protección
Área dominada < 114 m	p > 30	1) Arbolado, intercalado con superficies urbanizadas 2) Zona urbanizada	Arbolado	Someros pero más profundos que en tramos superiores	1) Erosiones superficiales fuera del bosque 2) En el cauce del arroyo principal posibilidad de fuertes arrastres en avenidas.	Se estima media	1) Mantener el bosque natural donde exista 2) Controlar la erosión del cauce y el transporte sólido de fondo en el arroyo, para que no afecte a las infraestructuras	Protección
	30 > p > 12	Zona urbana. Restricciones en la zona de paso del arroyo						
	p < 12	Zona totalmente urbanizada	Zona urbana. Restricciones donde pasa el arroyo	Coluvial	Zona de depósito de sedimentos (cono de deyección)	Se estima media	Dejar el espacio para el tránsito de las avenidas y controlar el transporte sólido durante las mismas	Protección

Tabla 5.5. Ordenación agro-hidroológica de la cuenca vertiente al arroyo de Buena Esperanza (Provincia de Tierra de Fuego, Argentina)

5.4. GUÍA DE BUENAS PRÁCTICAS PARA MINIMIZAR LA GENERACIÓN Y EMISIÓN DE SEDIMENTOS EN LAS CUENCAS REPOBLADAS CON ESPECIES DE CRECIMIENTO RÁPIDO, SOMETIDAS A OPERACIONES FORESTALES (REGIÓN DE VALDIVIA, CHILE)

Se comienza por definir como *buenas prácticas*, los procedimientos que ayudan a que la ejecución de las actividades de manejo forestal se lleve a cabo de manera sostenible desde el punto de vista ambiental, económico y social; con el fin de facilitar la *certificación ambiental*. En Chile se entiende que estas prácticas son voluntarias, aunque en algunos países se han incorporado a su normativa legal.

Objetivo y factores que intervienen en las prácticas de las operaciones forestales

El principal objetivo que se pretende es resguardar la calidad del agua, no sólo para el abastecimiento de consumo humano, sino también como hábitat de la vida silvestre, actuando para ello en el control de la generación y emisión de los sedimentos en las diferentes operaciones forestales:

- Preparación del suelo para las repoblaciones
- Cosecha (extracción de la madera a tala rasa)
- Manejo de desechos
- Construcción de caminos forestales
- Transporte forestal.

Como factores que inciden en la selección de cada práctica, se encuentran:

- Relieve: pendiente de la ladera; micro-relieve; cercanía a los cauces de drenaje
- Propiedades del suelo: textura, estructura, capacidad de compactación
- Clima
- Tipo de operación
- Análisis económico: relación Costo/Beneficio.
- Normativas para el manejo de combustibles químicos y residuos.

Impactos

Se entienden tanto los derivados directamente de las operaciones forestales, como los causados como consecuencia indirecta de los mismos. En el catálogo se incluyen:

- Preparación del suelo, roza y quema de desechos
- Procesos erosivos acelerados por cortas en grandes superficies sobre terrenos accidentados
- Deslizamientos debidos a la alta densidad de caminos y canchas de acopio
- Utilización de maquinaria en la época húmeda, lo que origina una elevada remoción y compactación del suelo
- Emisión de sedimentos a los cauces por falta de una franja de vegetación de riberas que actúe de protección.

Buenas prácticas

1. En las operaciones de preparación del suelo y el tratamiento de los desechos, como norma general y prioritaria hay que conocer bien la zona de actuación y planificar correctamente las operaciones forestales. En concreto, se debe:
 - Evitar o minimizar la alteración del suelo en zonas ribereñas o de márgenes de los cauces fluviales
 - Realizar las labores sobre el terreno de forma que se controle la escorrentía superficial
 - Dejar los desechos ordenados debidamente según curvas de nivel, para favorecer la infiltración y el control de la escorrentía superficial, a fin de evitar la erosión del suelo y reducir la emisión de sedimentos a los cauces.

2. En las operaciones de cosecha se recomienda:
 - Reducir el tamaño de las superficies de corta a tala rasa
 - Evitar que la operación afecte a los cauces fluviales y a la vegetación de riberas
 - Utilizar la maquinaria que menos afecte a las propiedades del suelo
 - Evitar huellas según máxima pendiente.

3. En el diseño de la red de caminos y el transporte forestal se puede incidir de forma importante en los impactos, debiéndose por tanto considerar los siguientes aspectos:
 - Reducir los movimientos de tierras, limitando a lo imprescindible; así como las pendientes elevadas que favorecen la erosión.
 - Realizar el diseño y las obras menores necesarias para consolidar los terrenos afectados por los movimientos de tierras
 - Instalar los servicios de drenaje necesarios, diseñándolos de modo que su funcionamiento no contribuya a favorecer los procesos de erosión del suelo.
 - Evitar en lo posible el cruce y la proximidad de los cursos de agua

En lo que respecta al cruce de los cauces de agua:

- Realizar los cruces en los puntos donde el lecho sea lo más estable posible
 - Minimizar la alteración del cauce en el lugar del cruce
 - Evitar alterar la migración y movimiento de la fauna piscícola.
4. En cuanto al manejo de combustibles químicos y residuos se debe considerar:
 - Limitar su uso
 - Asegurar su almacenamiento
 - El manejo de estas sustancias debe realizarse lejos de los cursos de agua.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones se agrupan por contenidos y de acuerdo a los mismos se han establecido los siguientes bloques:

1. La incidencia del bosque en el ciclo del agua y en la dinámica geo-torrencial que se desencadena en la cuenca vertiente, cuando en la misma suceden precipitaciones torrenciales o fusiones repentinas del manto de nieve.
2. La repercusión de las cubiertas arboladas en las disponibilidades hídricas de la cuenca vertiente en los periodos que transcurren entre eventos torrenciales.
3. La ordenación agro-hidrológica y de la restauración hidrológico-forestal como instrumentos de protección y aprovechamiento sustentable de la cuenca vertiente.

6.1. La incidencia del bosque en el ciclo del agua y en la dinámica geo-torrencial que se desencadena en la cuenca vertiente, cuando en la misma suceden precipitaciones torrenciales o fusiones repentinas del manto de nieve.

Centrándose en España, por tratarse de una situación bien conocida y que puede servir de introducción al tema a comentar, las inundaciones se han asociado siempre con el anegamiento y posterior aterramiento de las mejores vegas de cultivo y la consiguiente ruina de las cosechas en las áreas bajas o dominadas de la cuenca, además de causar daños en infraestructuras civiles y en ocasiones desgracias personales. En la actualidad el problema se agudiza en muchos casos, porque algunas de las antiguas vegas se encuentran parcialmente transformadas en áreas residenciales o industriales, con lo que su valor se ha incrementado y su protección es reclamada con mayor intensidad.

Se ha culpado de este problema a que las montañas estaban y aún están parcialmente desarboladas; por lo que, cuando ocurren eventos torrenciales, se producen fuertes erosiones en estas áreas dominantes de la cuenca; encargándose el geo-dinamismo torrencial de transportar los sedimentos erosionados a las partes dominadas, arrastrando en su recorrido todo lo que encuentran por delante, mientras el flujo tenga capacidad de mantener incorporados los sedimentos al mismo; hasta que finalmente los deposita cuando pierde dicha capacidad.

Esta escena es real, se viene repitiendo desde la antigüedad, sobre todo en las grandes cuencas de los ríos más importantes que se dirigen al Mediterráneo (aunque se da también en las que vierten al Atlántico) y, para mitigarlo, en el pasado se han llevado a cabo grandes repoblaciones forestales en las cadenas montañosas cabeceras de cuencas.

El ciudadano tiene conciencia de ello, por haberlo visto el mismo o porque se lo han contado. Le resulta difícil concebir una inundación sin el consiguiente fenómeno geo-torrencial. La propia climatología y, sobre todo la orografía de la península ibérica, hacen que estos fenómenos se manifiesten con total crudeza.

Sin embargo, si los montes estuvieran arbolados, las inundaciones también tendrían lugar, pero la erosión del suelo y todos los consiguientes procesos geo-torrenciales se verían reducidos. Por eso hay que diferenciar, desde el punto de vista científico, la parte de la inundación causada por los caudales líquidos de avenida, de los efectos geo-torrenciales asociados a la misma y en gran medida derivados del estado de degradación de la cubierta vegetal en la cuenca vertiente.

El objetivo inicial del Proyecto EPIC FORCE era conocer y explicar científicamente los efectos del arbolado que cubre una cuenca hidrográfica, en la laminación de los volúmenes de escorrentía y en los caudales punta de su red de drenaje, ante la aparición de precipitaciones torrenciales o repentinas fusiones del manto de nieve en dicha cuenca; luego en principio no se planteaba la cuestión del geo-dinamismo torrencial en la misma, aunque tampoco se descartaba. Esquemáticamente el objetivo y la metodología del Proyecto EPIC FORCE se sintetizan en la Figura 6.1; en la que la Y representa la emisión de sedimentos por los caudales de avenida, el resto de los términos aparecen indicados en la propia figura.

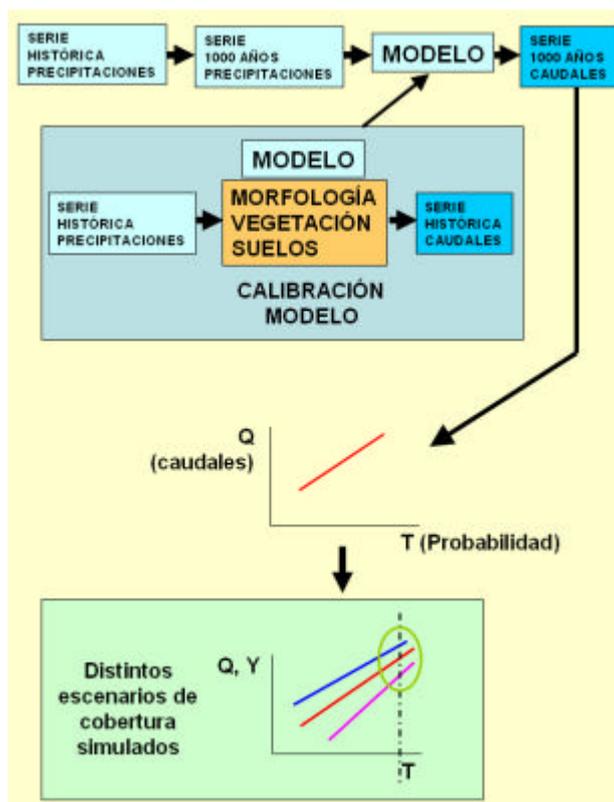


Figura 6.1.- Objetivo y esquema operativo del Proyecto EPIC FORCE. En el cuadro final de esta figura, la línea azul corresponde a una cuenca no arbolada y la línea rosa a una cuenca arbolada.

Las investigaciones realizadas en diferentes cuencas experimentales con y sin cubierta arbórea ante eventos torrenciales extremos, han evidenciado que tanto los volúmenes de escorrentía directa como los caudales punta a la salida de la cuenca tienen a coincidir (no así en el caso de la emisión de sedimentos). Pero si la influencia del arbolado no se percibe, es a causa de la magnitud del evento torrencial y no porque el comportamiento *per se* del arbolado en el ciclo del agua se altere; por lo que su interpretación correcta es que ante eventos torrenciales extremos, la cubierta arbórea no resulta suficiente para hacer sentir sus efectos en el ciclo del agua dentro de la cuenca vertiente y, por consiguiente, no protege los otros usos a los que ésta se dedica, especialmente en sus áreas dominadas. Concepto que lógicamente sobrepasa el ámbito puramente científico e incide en el de las previsiones del comportamiento de la cuenca, sometida a unos usos concretos, ante la incidencia en ella de determinados eventos torrenciales.

La cuestión se puede plantear en los siguientes términos: *¿la influencia ejercida por las cubiertas arboladas (especialmente las situadas en las áreas dominantes o de cabecera) en el ciclo del agua en la cuenca, resulta eficiente para evitar los daños por avenidas en sus valles o áreas dominadas?*. La respuesta es clara: para algunas situaciones sí y para otras no; dependiendo de la magnitud de los eventos torrenciales y del uso que se haga de la cuenca vertiente. En este contexto es donde tiene sentido plantear tanto la ordenación agro-hidrológica, como la restauración hidrológico-forestal de la cuenca vertiente, que trasciende del campo exclusivamente científico del Proyecto EPIC FORCE, para iniciarle en el área de sus aplicaciones.

Lo habitual es asociar a los eventos torrenciales con su probabilidad de ocurrencia, usando para ello el concepto de periodo de retorno T . De este modo, para periodos de retorno largos T_L , los efectos de la cubierta arbórea en el ciclo del agua en la cuenca vertiente resultan moderados, tanto más cuanto mayor es el periodo de retorno. Sin embargo, para eventos de periodo de retorno cortos T_C , el efecto ejercido por las mismas cubiertas arbóreas en el ciclo del agua en la cuenca vertiente puede ser determinante, regulando tanto los volúmenes de escorrentía directa como los caudales punta en su red de drenaje. Por esta razón es importante analizar ambos efectos a la vez, para evitar que la presentación de los resultados se interprete de forma sesgada. Pues, aunque el estudio se centre únicamente en los *valores del flujo*, la sociedad a la que se le transmite los va a interpretar directamente como *valores de daños* y este equívoco conviene aclarar. Por tanto, cuando se informa a la sociedad sobre el efecto de las cubiertas arboladas en el comportamiento del ciclo del agua en la cuenca vertiente, se deben precisar las dos cuestiones (que se muestran en la Figura 6.2) siguientes:

- a) La diferencia entre los eventos torrenciales *ordinarios* (que se repiten con periodos de retorno cortos T_C) y eventos torrenciales *extraordinarios* o en el límite los eventos *extremos* (que tienen lugar con periodos de retorno largos T_L).
- b) Una función que permita relacionar los incrementos de los volúmenes de escorrentía directa y de los caudales punta a la salida de la cuenca objeto de estudio, con los daños que razonablemente se prevén de ellos.



Figura 6.2.- Relación entre los efectos que causan los eventos torrenciales en la cuenca hidrográfica y los posibles daños que provocan en ella, dependiendo de sus características y del grado de protección existente en la misma.

Un caudal elevado en una zona despoblada, que no cause daños ni a personas ni a bienes, no representa ningún interés desde el punto de vista social; ya que los daños ocasionados al medio se asumen como algo intrínseco a la dinámica torrencial, pero no ocurre lo mismo si afecta a áreas pobladas. Por tanto, es preciso realizar una valoración de los daños esperables en cada situación para el mismo caudal de avenida.

En síntesis, ante los eventos torrenciales extremos las cubiertas arboladas pueden no ser lo suficientemente eficientes, para asegurar la protección necesaria a los restantes usos a los que se destina la cuenca; pero estos eventos son poco frecuentes. Mientras que ante eventos torrenciales ordinarios, que suceden con mucha mayor frecuencia, las cubiertas arboladas pueden resultar eficientes para asegurar la protección a los diferentes usos existentes en la cuenca. En consecuencia, se puede afirmar que los beneficios que aportan las cubiertas arboladas a la cuenca (sobre todo si se sitúan estratégicamente en ella) son muy importantes, aunque en ocasiones no se perciban, tanto por los beneficios directos del bosque en las áreas donde se asienta, como por los daños que con su presencia se evitan en las áreas dominadas de la cuenca, lo que en definitiva supone una puesta en valor económico de la misma. La Figura 6.3 se muestra esquemáticamente lo que se acaba de exponer.

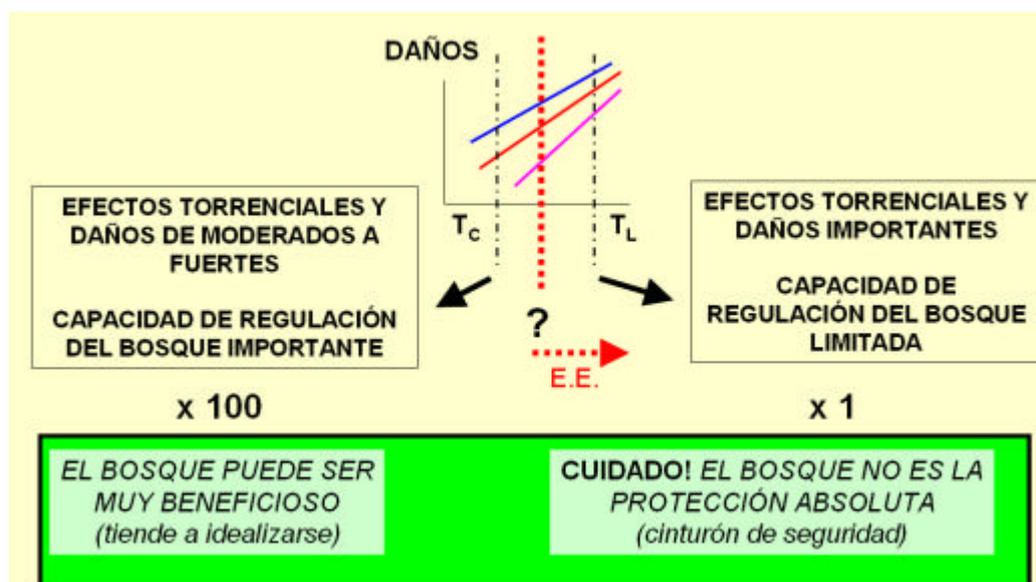


Figura 6.3.- Los eventos torrenciales ordinarios son frecuentes ($x100$) y el efecto del bosque en el control de sus posibles daños eficiente. Los eventos extremos son ocasionales y el bosque, por sí mismo, no es suficiente para amortiguar sus efectos ($x1$). En este contexto el evento extremo, supera el ámbito científico y entrar en el ámbito de la decisión en la planificación hidrológica. En el gráfico de la figura, la línea azul corresponde a una cuenca no arbolada y la línea rosa a una cuenca arbolada.

El mito que el bosque protege ante cualquier evento o, dicho de un modo más concreto, que la falta de bosque es la causa de todos los desastres y pérdidas, no es honesto presentarlo como tal; es necesario transmitir a la sociedad los efectos del bosque en la protección de la cuenca vertiente con las precisiones oportunas, para que su opinión no sufra el efecto péndulo y pase a considerar que: si el bosque no puede protegernos de los grandes eventos torrenciales, no sirve para nada; porque esto representa una auténtica

falacia y una verdadera amenaza para planificar el uso sostenible de los recursos agua y suelo en la cuenca vertiente. El riesgo cero no existe y la sociedad debe saberlo.

En este contexto, la protección que ofrece el bosque a la cuenca vertiente ante los diferentes eventos torrenciales se podría asimilar con el efecto del *cinturón de seguridad* para el conductor de un automóvil. Lo previsible es que si el conductor sufre un accidente circulando a 90 kilómetros por hora, el llevar puesto el cinturón le resulte efectivo; pero si el vehículo supera los 250 kilómetros por hora, lo normal es que el cinturón no surta ningún efecto. A pesar de ello, no se cuestiona la obligatoriedad de utilizar el cinturón. De modo similar debería la comunidad científica plantear y transmitir a la sociedad en todas sus comunicaciones la protección que ejerce el bosque a las cuencas vertientes en situaciones de eventos torrenciales (sean ordinarios o extraordinarios), exponiendo las dos orientaciones comentadas

La elevada magnitud de los daños que tienen lugar durante un evento extremo, no se debe tanto a la ausencia del bosque en sí, sino a la ocupación de las áreas de inundación por la población y sus infraestructuras. Por otro lado, la existencia del bosque en las áreas dominantes de la cuenca, puede disminuir sensiblemente los daños en dichas zonas ocupadas, en el caso de eventos torrenciales ordinarios.

En cualquier caso, las situaciones de riesgo se deben estudiar objetivamente, realizando un análisis detallado de la zona desde el punto de vista hidráulico, ajustado a unas hipótesis hidrológicas lógicas y aceptablemente seguras. Este análisis puede llegar a ser inviable en muchas ocasiones; por lo que es una buena labor trabajar en la línea de elaborar métodos de estimación sencillos y aceptados por todos los actores implicados, que ayuden a valorar los riesgos y poder planificar adecuadamente las medidas para protegernos de ellos

Por otra parte, la diferencia entre los eventos torrenciales *ordinarios* y los *extraordinarios* hasta concluir en los *extremos* es muy importante también en la práctica de la ordenación agro-hidrológica y de la restauración hidrológico-forestal de una cuenca vertiente. Ambos tipos de eventos causan daños en los usos que se practican en la cuenca vertiente, tanto más graves cuanto más extraordinario sea el evento. Pero mientras que para los primeros, más frecuentes, el bosque puede representar una solución eficiente al problema geo-torrencial en la cuenca, pudiéndose corroborar esta afirmación con argumentos científicos sólidos; para los segundos, más esporádicos, la protección que le ofrece el bosque puede resultar insuficiente para conseguir la seguridad requerida de los usos existentes en la cuenca; lo que implica que se deben adoptar medidas complementarias para protegerla.

Dichas medidas complementarias pueden resultar más eficientes si se conjugan con el bosque, potenciando la capacidad protectora de éste; pues aunque resulte insuficiente por sí mismo en situaciones de eventos extremos, puede contribuir en la defensa de la cuenca ayudando a las otras medidas más directas, que de forma aislada tampoco resultan eficientes. La restauración hidrológico-forestal es un ejemplo, pues conjuga la corrección con obras hidráulicas de los cursos torrenciales, con la repoblación forestal de sus cuencas vertientes, asegurando de este modo la efectividad de las primeras.

Sintetizando, los efectos más destacados que presenta el bosque ante las avenidas y los efectos geo-torrenciales asociados a ellas, en la cuenca hidrográfica son:

1. El bosque interviene en la dinámica del ciclo del agua en la cuenca hidrográfica, por tanto incide en la formación de las avenidas.
2. A medida que aumenta la magnitud de una precipitación extrema, generadora del caudal de avenida, los posibles efectos del bosque en la laminación de la avenida son cada vez menos revelantes.
3. El bosque incide en el control de la erosión del suelo en la cuenca, lo que repercute en la reducción de la carga en suspensión que transportan los cursos que drenan por la misma y en la disminución de la tensión cortante de la corriente que circula por ellos, que se traduce en una reducción del transporte sólido de fondo. La protección que aporta el bosque a la cuenca ante los fenómenos geotórrenciales pueden ser tan importante o más que su efecto en la laminación del caudal líquido de avenida, sobre todo en cuencas tórrenciales de montaña.
4. La incidencia del bosque tanto en la laminación de las avenidas como en el control del geo-dinamismo tórrencial en las mismas, es mayor en las cuencas pequeñas o medianas ($< 100 \text{ km}^2$) que en las grandes cuencas ($> 100.000 \text{ km}^2$).
5. En consecuencia, resulta lógico admitir que en grandes cuencas hidrográficas el efecto de los bosques en la laminación de las avenidas presenta serias limitaciones ante precipitaciones tórrenciales extremas, cuando estas últimas abarcan superficies importantes dentro de la cuenca y se prolongan en el tiempo.
6. La gestión forestal, que es el instrumento que maneja el bosque a lo largo del tiempo, interviene en el ciclo del agua y en consecuencia incide sobre los recursos hídricos.
7. En una cuenca deforestada que se repueble prácticamente en su totalidad con la pretensión de laminar las inundaciones en su área dominada, su comportamiento a largo plazo implica:
 - a. Respecto al control de las avenidas, la cuenca en cuestión presentará su situación óptima, cuando la repoblación se encuentre en su momento de máximo desarrollo; volviendo a una situación más parecida a la de partida cuando la masa arbolada adulta tenga menores consumos de agua.
 - b. Pero bajo el punto de vista de emisión de sedimentos, es en la última etapa de bosque adulto totalmente desarrollado y consolidado, cuando resulta más eficaz; pues reducirá al máximo la descarga de sedimentos, mejorando de este modo la calidad del agua, incluso durante las avenidas.
8. Es habitual asociar a los eventos tórrenciales con su probabilidad de ocurrencia, utilizando el concepto de periodo de retorno. Para periodos de retorno largos, los efectos del bosque en el ciclo del agua en la cuenca resultan moderados e incluso escasos, mientras que para eventos de periodo de retorno cortos, el efecto del bosque en el ciclo del agua en la cuenca puede ser determinante. Por ello es importante analizar ambos efectos a la vez, para evitar interpretaciones sesgadas. Pues, aunque se trate de *valores de las avenidas o de los efectos geo-tórrenciales*, la sociedad a la que se le transmite los va a interpretar directamente como *valores de daños* y este equívoco conviene dejarlo muy claro.
9. Los daños que puede originar un evento extremo, que no puedan ser evitados por una adecuada cubierta vegetal de la cuenca, se compensan con creces por los beneficios que esta misma cubierta vegetal genera día a día y durante los eventos de reducida magnitud.
10. La elevada magnitud de los daños que tienen lugar en la cuenca vertiente durante un evento extremo, no se debe tanto a la ausencia del bosque en sí, sino a la ocupación de las áreas de inundación por la población y sus infraestructuras.

6.2. La repercusión de las cubiertas arboladas en las disponibilidades hídricas de la cuenca vertiente en los periodos que transcurren entre eventos torrenciales.

Al margen de los efectos del bosque en el comportamiento de los ciclos del agua y de los sedimentos en la cuenca vertiente, cuando en ella acontecen eventos torrenciales (analizado en el epígrafe anterior); ha existido desde antiguo la controversia sobre si el bosque influye o no en las condiciones del clima y, más recientemente, ha surgido la preocupación por el consumo de agua de los bosques y su incidencia en el balance hídrico de una cuenca hidrográfica. En este texto se han tratado los aspectos siguientes:

- a) La controversia mantenida en el siglo XIX en Francia, entre los *naturalistas*, defensores de la influencia del bosque en el microclima de una región, y los *ingenieros* que lo ponían en duda y exigían comprobaciones de campo para corroborarlo. Controversia que se reanudó el siglo siguiente.
- b) La utilización de las *cuencas comparadas* para analizar los efectos del arbolado, generalizando de la vegetación, en el ciclo del agua en la cuenca vertiente; la presentación de sus principales resultados y el análisis de los mismos.
- c) Los problemas hídricos en las repoblaciones con fines protectores efectuadas en las cabeceras de las cuencas vertientes en clima semiáridos.

A continuación, se resumen las conclusiones obtenidas sobre los aspectos *a)* y *b)*, que son las que afectan a este apartado; las del apartado *c)* se tratan al comentar la ordenación agro-hidrológica y de la restauración hidrológico-forestal de una cuenca vertiente en el apartado siguiente.

1. En relación con la controversia mantenida desde el siglo XIX respecto de la interacción entre el bosque y el clima, es evidente que los *naturalistas* no supieron plantear correctamente sus principios o más bien se excedieron con ellos y, por lógica, terminaron aceptando el requerimiento que les impusieron los *ingenieros*: la necesidad de medir, para poder verificar las hipótesis de partida; lo que derivó en el siglo XX a la utilización de las *cuencas comparadas*. Pero también es cierto que algunos principios implícitos adoptados por los *naturalistas*, como es la existencia de una *vegetación climática*, no era posible comprobarlo con los procedimientos de medida adoptados en su momento, ni tampoco con el método de las *cuencas comparadas*; porque el significado de su contenido trasciende de lo que se puede medir con éstas. Sin embargo, en la práctica los *ingenieros* (al menos los ingenieros de montes en España) han utilizado el principio de la *vegetación climática* en los trabajos de restauración de cuencas vertientes desde sus inicios, aunque los trabajos de restauración como tales, los estructuraran desde el esquema propuesto por los *ingenieros*.
2. Los resultados obtenidos en las *cuencas comparadas*, sobre el impacto de la *cuenca de tratamiento* respecto de la *cuenca no alterada* resultan obvios (**Hewlett**, 1971; **Bosch & Hewlett**, 1982; **Cosandey**, 1995; **Adréassian**, 2004; etc.); la deforestación aumenta las escorrentías (que para algunos autores representan caudales anuales disponibles, a los que también denominan cosechas de agua), mientras que la repoblación lo disminuye; aunque se trata de resultados extremadamente dispersos. Sin embargo, dichas investigaciones, en especial la de

mayor impacto **Bosch & Hewlett** (1982), se centraron básicamente en los efectos a medio plazo de la repoblación forestal y a corto plazo de la deforestación, sin prestar mayor atención a las transiciones entre los estados de arbolado y desarbolado. Por el contrario **Hibbert** (1967), utilizando las mismas cuencas de Coweeta, llegó a la conclusión de que la única forma de mantener desforestada una cuenca era actuando permanentemente sobre ella, pues de otro modo ésta se volvía a cubrir con la aparición de los sucesivos estadios evolutivos de la vegetación *climática*. Comprobó que los efectos del tratamiento (deforestación) tenían una duración breve en las cuencas vertientes analizadas, de manera que transcurridos entre 7 y 25 años desde su tratamiento y, dependiendo de la propia vegetación de la cuenca, su efecto sobre las escorrentías prácticamente se anulaba. A la misma conclusión que **Hibbert** llegaron **Swift & Swank** (1981); **Kuczera** (1987); **Swank et al.**, (2001); **Watson et al.** (2001). Por otro lado, **Mc Guinness & Harrol** (1971); **Langford & Mc Guinness** (1976) y **Andréassian** (2002, 2004), analizando a largo plazo los efectos de una repoblación forestal en el equilibrio hidrológico de una cuenca vertiente de carácter agrícola, comprobaron que, pasados los primeros años tras la repoblación, la reducción de las escorrentías (caudales útiles o cosechas de agua) era muy rápida y que el equilibrio hidrológico prácticamente quedaba restaurado a partir de los 10-15 años desde la repoblación.

La mayor aportación que han prestado a la ciencia los resultados obtenidos a través de las experiencias en *cuencas comparadas*, es que, leídas correctamente con una referencia de al menos 20 años (que tratándose del sector forestal resulta un período más bien corto), responden en todo a la lógica que cabe esperar de ellos. Es lógico que una cuenca deforestada presente un escurrimiento directo superior a la que pueda presentar una cuenca arbolada y que, conforme la vegetación va cubriendo a una cuenca que ha sido previamente deforestada, la escorrentía directa en la misma disminuya. Pero también es cierto que los resultados presentados a través de las *cuencas comparadas* muestran una visión parcial de lo que ocurre en una cuenca tras las precipitaciones que tienen lugar en la misma, de las que no se comenta nada sobre su intensidad (da la impresión que no se tienen en cuenta las lluvias torrenciales). Por lo demás, se trata de resultados previsibles cualitativamente, pues se disponía de un conocimiento empírico del crecimiento de las plantaciones forestales. Su valor añadido ha consistido en la confirmación de las previsiones, ponerlas de manifiesto y sobre todo en la cuantificación de los resultados.

Sin cuestionar en absoluto el interés de los resultados obtenidos a través de las *cuencas comparadas*, se comenta a continuación la aportación de las mismas a la ordenación agro-hidrológica de una cuenca vertiente y su posterior proyecto de restauración hidrológico-forestal, si fuera preciso; así como algunas de sus limitaciones derivadas de su propia metodología. Entre las primeras se mencionan:

- a) Contribuyen a precisar las necesidades de agua en una repoblación forestal (o en un repoblado natural) en su fase de implantación en el monte y en las primeras etapas de crecimiento de la vegetación; sobre todo para las especies que se han utilizado en las experiencias de *cuencas comparadas*.
- b) Continuando con la aportación anterior, pueden mejorar las previsiones del resultado esperado en una repoblación forestal, es decir, sus posibilidades de éxito;

lo que es sumamente interesante tratándose de cuencas ubicadas en climas semiáridos

- c) De lo comentado en los dos epígrafes *a)* y *b)*, se deduce que es posible realizar una estimación del gasto hídrico adicional que comporta la implantación de una vegetación arbolada respecto de otro tipo de cubierta vegetal, para el periodo comprendido desde que se inicia la repoblación hasta que se asegura la existencia de la masa arbolada (10-20 años, dependiendo de la latitud y altitud del paraje en el que se ejecuta la repoblación).
- d) En algunos parajes y ante situaciones concretas, el gasto hídrico adicional que supone la instalación de una masa arbolada, en los 10-20 años siguientes a su plantación, puede plantear la conveniencia o no de realizar una repoblación forestal; cuando dichos recursos hídricos resultan determinantes para otros fines y apremie disponer de ellos en forma de escorrentía y su posterior almacenamiento. Conviene señalar que desde una perspectiva teórica la cuestión es muy clara; pero en situaciones reales resulta más compleja y de consecuencias no perceptibles a corto plazo, pues en el bosque todas sus propiedades están muy interconectadas y la consecución del objetivo señalado, podría acarrear problemas geo-torrenciales colaterales, que deben ser evaluarlos previamente, para posteriormente tratar de protegerse de ellos.

Entre las limitaciones se enumeran:

- e) La mayor parte de las experiencias en cuencas comparadas se refiere a pequeñas cuencas de menos de 2 Km², admitiéndose como norma general que con las grandes cuencas no se puede experimentar y que se trata de cuencas relacionadas con el clásico método hidrométrico, es decir, existe un *efecto de escala* de difícil cuantificación. Realmente las cuencas que tiene sentido ordenarlas y restaurarlas son en general las de tamaño mediano, > 100 Km².
- f) La información que aportada la *cuenca de tratamiento (o deforestada)* durante el tiempo que la vegetación se regenera en la misma, es normalmente reducida para la vida prevista (*turno*, en términos forestales) de una repoblación forestal; por lo que sólo se refiere a las necesidades hídricas en los primeros 10-20 años de su existencia, justamente coincidiendo con su fase de mayor crecimiento (el turno de una repoblación o de un regenerado natural en Europa puede oscilar entre los 70-100 años, para especies de crecimiento lento, y entre 25-45 años, para las de crecimiento rápido).
- g) Cuando el arbolado alcanza su desarrollo, sus exigencias hídricas se estabilizan dependiendo de su fisiología y de la estación en la que se ubica (definido por su clima y suelo, es decir, por las *condiciones climáticas*); luego si el arbolado se instala en una estación en la que no tiene cabida por las *condiciones climáticas* de la misma, vegetará mal y terminará por desaparecer de forma natural o quedará con un porte achaparrado.
- h) Los estudios de los fito-climatólogos ponen de manifiesto que la estación debe cumplir con unas condiciones determinadas de clima y suelo para poder acoger el arbolado o, dicho a la inversa, que cada especie de arbolado tiene unas características culturales que le hacen aptas para determinadas estaciones. Pero esto no quiere decir que la vegetación pueda condicionar el clima.
- i) Las preparaciones del terreno para las repoblaciones forestales se enmarcan en el contexto del apartado anterior *d)* y responden a situaciones en las que, por causa de la degradación del suelo, las características de la estación se encuentran en el

límite del *climax* para la vegetación arbolada a implantar. Las preparaciones tienen precisamente por objeto mejorar las condiciones del suelo, en especial su capacidad de retención del agua, para que en los dos años siguientes a la plantación los *brinzales* (las plantas introducidas con la repoblación) puedan superar las condiciones adversas del medio.

- j) Cuando se introducen pastizales en estaciones con capacidad para acoger el arbolado, el agua sobrante se transforma en escorrentía, que puede ser almacenada para su aprovechamiento directo; pero este incremento de la escorrentía también puede aumentar la erosión del suelo y el consiguiente transporte de los sedimentos; alterando así paulatinamente el primitivo *climax* y sustituyéndolo por otro estado de equilibrio que supone una menor protección de la cuenca ante eventos torrenciales, especialmente ante los extremos; si bien a largo plazo son los eventos torrenciales ordinarios los que le ocasionan el mayor deterioro, cuando sus efectos sobre el suelo son continuados y no se corrigen a su debido tiempo.
- k) En lengua española se crea una auténtica confusión cuando se habla de *cosechas de agua*, traducción directa del inglés de *water harvest*, para referirse a incrementos de escorrentía. La cosecha es el resultado de una producción, que sólo es posible en seres vivos, como son las plantas; pero no en el agua que cumple con la ecuación de continuidad y, por tanto, se mantiene constante. La palabra adecuada es *incremento de escorrentía* que se puede aprovechar de una forma inmediata, mientras que el agua del suelo, subsuelo o la de la atmósfera no es posible (en el texto se ha utilizado también el término *volúmenes útiles*, para significar la oportunidad para su utilización, pero tampoco resulta muy acertado).

6.3. La ordenación agro-hidrológica y la restauración hidrológico-forestal como instrumentos de protección y aprovechamiento sustentable de la cuenca vertiente

Se han definido como objetivos esenciales tanto de la ordenación agro-hidrológica como de la restauración hidrológico-forestal de una cuenca vertiente los siguientes:

- 1) La protección de la cuenca vertiente, para amortiguar los efectos geo-torrenciales que le puedan causar las precipitaciones torrenciales, ordinarias o extraordinarias, o las repentinas fusiones del manto de nieve que sucedan en la misma.
- 2) El mejor aprovechamiento de los recursos agua y suelo en la cuenca hidrográfica, es decir, su aprovechamiento sustentable.

La *ordenación agro-hidrológica* se centra en el estudio del estado físico de la cuenca vertiente y en el análisis de su previsible comportamiento ante los eventos torrenciales, tanto ordinarios como extraordinarios, con el propósito de conocer como es realmente la cuenca y cómo se comporta; así como para prever su evolución y detectar sus carencias, a fin de proponer las medidas pertinentes para tratar de subsanarlas.

La *restauración hidrológico-forestal* implica llevar a cabo en la cuenca vertiente las medidas adoptadas en la *ordenación agro-hidrológica*, para cumplir con los objetivos establecidos: protegerla ante los efectos causados por el geo-dinamismo torrencial y asegurar su buen funcionamiento hidrológico y la correcta conservación de sus suelos en los periodos que transcurren entre eventos torrenciales.

En los primeros proyectos de restauración hidrológico-forestal su objetivo único era la protección de la cuenca vertiente ante los efectos que le pudiera causar el geo-dinamismo torrencial provocado por los eventos torrenciales. Para ello se actuaba en sus cauces de drenaje con obras hidráulicas de corrección, para regular a la corriente en los momentos de avenidas, con la finalidad de que ésta transitara del modo más uniforme posible y tratando que la incorporación de la descarga sólida, procedente de la abrasión por la corriente del lecho y márgenes de los cauces en cuestión, fuera la menor posible.

Pero para que estas obras hidráulicas resultaran efectivas en el tiempo, se restauraba la cuenca vertiente, para estabilizar sus laderas, controlar los procesos de erosión hídrica del suelo y reducir el aporte de sedimentos en suspensión, derivado del lavado de la cuenca vertiente, al cauce principal de drenaje. Para esta función resultaba y resulta esencial la creación y mantenimiento de cubiertas arboladas en los lugares estratégicos de la cuenca vertiente (áreas dominantes y superficies de pendientes más elevadas). Estas medidas en los cauces y en las cuencas que los alimentan se mantienen en los proyectos de restauración hidrológico-forestal actuales, pues constituyen uno de los objetivos esenciales de los citados proyectos.

Lo que ocurría en el pasado, es que se consideraba únicamente la capacidad del bosque para frenar los procesos de erosión y degradación del suelo en la cuenca vertiente, sin reparar las naturales exigencias hídricas del bosque para acometer tales objetivos; por ello en cuencas muy degradadas se realizaron importantes repoblaciones forestales para protegerlas de los efectos del geo-dinamismo torrencial. En las cuencas de montaña europeas en la mayoría de los casos estas medidas no derivaron en problemas posteriores, porque pasado el tiempo de asentamiento de dichas repoblaciones y alcanzado una cubierta estable o pseudo-estable (en la situación óptima se trataba del *climax*), las exigencias hídricas de las nuevas coberturas vegetales se estabilizaron con el medio. Además cuando las repoblaciones se realizaron en cuencas degradadas, con suelos pobres y climas semiáridos, las condiciones del medio aportaban lo justo para instalar las repoblaciones, no existía un consumo importante de agua, que pudiera afectar, ni siquiera sentir, seriamente aguas abajo de las áreas repobladas; mientras que en las regiones húmedas de montaña, como las repoblaciones también se efectuaron en suelos pobres, no hubo tampoco un consumo importante de agua, como para que se sintiera aguas abajo. Todo esto se comenta porque en América Latina las condiciones pueden ser diferentes y, de serlo, se deben considerar como tales y obrar en consecuencia.

Por otra parte, los restauradores de cuencas vertientes se toparon en muchas ocasiones con problemas por falta de humedad edáfica en las áreas de montaña objeto de los trabajos de repoblación forestal, especialmente en zonas entre subhúmedas y semiáridas, lo que les obligó a mejorar las técnicas de preparación del suelo para lograr superar dichos problemas; pero la cuestión del consumo de agua por los árboles (salvo posibles excepciones) no se planteaba.

En el panorama de la investigación actual diversos autores **Calder** (1997, 1998, 1999, 2002), **Bruijnzeel** (1989, 1994, 2004, 2005), **Huber** entre otros, han realizado balances hídricos en áreas arboladas y evaluado la evapotranspiración real de las mismas. El resultado más importante de sus investigaciones, es el haber constatado que, cuando en extensas superficies de una cuenca vertiente se produce un cambio en el uso del suelo, bien de desarboladas a arboladas o viceversa, se modifica durante el tiempo que dura la

transición (del orden de 10-25 años, dependiendo de los diferentes tipos de cubiertas arboladas) las disponibilidades de agua en las diferentes áreas de la cuenca vertiente. Este aspecto es temporal, como se ha señalado, pero tiene especial interés en la *ordenación agro-hidrológica* de una cuenca vertiente; no en relación con el objetivo de la protección de la misma ante eventos torrenciales; pero sí en lo que se refiere al objetivo de su aprovechamiento sustentable, porque altera durante un tiempo importante las disponibilidades del recurso agua por sus pobladores.

En la ordenación agro-hidrológica de cuencas y en la restauración hidrológico-forestal de éstas, es necesario considerar estas circunstancias en el momento de adoptar las decisiones, así como asumir los tiempos que impone la naturaleza en el crecimiento de las especies forestales y las necesidades hídricas de éstas en sus diferentes fases de crecimiento y estabilización de la masa arbolada. No se cuestionan los objetivos finales de la restauración hidrológico-forestal, que en la gran mayoría de los casos sus beneficios han justificado sus inversiones de todo tipo, sino la forma y oportunidad de llevarlo a la práctica.

Aunque la debida importancia del consumo de agua por las masas arboladas sea una cuestión que se ha puesto de actualidad en las últimas décadas; en realidad, implícitamente las exigencias hídricas de la vegetación siempre se han considerado, tanto en la agricultura convencional (necesidades de agua para los cultivos y su adición mediante riegos hasta lograr cubrirlas), como en la selvicultura tradicional, en la que la *elección de especie* se supedita a su capacidad para atemperarse al medio donde se implanta. Se eligen especies climácicas o pseudos-climácicas de estadios anteriores en la sucesión al climax, para asegurarse que las condiciones del medio (en el que la humedad edáfica desempeña un papel primordial) permitan a la planta instalarse en él. Incluso se mejoran temporalmente dichas condiciones, mediante preparaciones del terreno previas a los trabajos de plantación, para que el suelo pueda retener más agua de las precipitaciones y de este modo asegurar la plantación en sus dos primeros años en el monte. Las preparaciones de suelo anteriores a la plantación se extreman sobre todo en las repoblaciones en zonas semiáridas y requieren un previo estudio edafológico del área a repoblar.

En la *elección de especie* de las repoblaciones forestales con fines protectores, es esencial que la especie se atempere al medio; mientras que en las repoblaciones de producción no existe esta cuestión de fondo. Es muy importante conocer el destino final de una repoblación y la capacidad del medio para acogerla, en ello implícitamente las necesidades hídricas de las diferentes especies tienen una intervención muy importante. Sintetizando se pueden presentar los dos casos siguientes:

1. Cuando se trata de repoblaciones altamente productivas, como algunas plantaciones de pinos o eucaliptos en Chile, donde las condiciones del medio para acoger a la plantación son muy favorables e incluso óptimas, las características fisiológicas de la planta a introducir son un factor determinante en la *elección de especie*, porque permite asegurar la producción esperada con la plantación. En algunos casos estas repoblaciones se llegan incluso a abonar y el ciclo productivo es relativamente corto (si se utiliza el término forestal clásico, se hablaría que el turno de corta está entre 15-30 años). Estas plantaciones presentan similitudes con los cultivos agrícolas y por tanto la corta final, normalmente a hecho o matarrasa, se identifica con la cosecha y se le denomina de este modo. En este tipo de

plantaciones tiene pleno sentido contemplar el balance hídrico de las mismas, para asegurar su rendimiento sustentable y evitar problemas por escasez de agua en los predios situados aguas abajo de las mismas.

2. Pero si se refiere a repoblaciones con fines protectores (que tratan de controlar la erosión del suelo en la propia superficie que se repuebla y la defensa ante el geodinamismo torrencial de las áreas dominadas de la cuenca vertiente, cuando aparecen en ella eventos torrenciales extraordinarios), *la elección de especie* no se puede limitar a conocer las características fisiológicas de la planta y a asegurarse su perfecto estado sanitario, sino que hay también otros aspectos a considerar tales como: la capacidad de la especie para atemperarse al medio en el que se instala (auto-ecología), y la posibilidad de mejorar éste para los primeros años de la repoblación, lo que exige un buen conocimiento edafológico del área a repoblar y del comportamiento hidrológico de las técnicas de preparación del terreno para la repoblación.

Cuando se precisan todos estos requisitos, sobre todo en áreas semiáridas y muchas veces sobre suelos degradados, es porque las disponibilidades hídricas del área en cuestión están en el límite de acoger la repoblación. Si la repoblación prospera, lógicamente la masa arbolada transpira y necesita de recursos hídricos para subsistir, pero al mismo tiempo sus sistemas radicales van generando un suelo forestal, donde anteriormente existía un suelo degradado o a lo sumo un suelo pobre cubierto de matorral. Este suelo forestal permitirá en el futuro un mejor aprovechamiento del agua procedente de las precipitaciones. Masas arboladas con estas características existen, su producción es muy baja y su turno elevado entre 60-90 años, pero su objetivo principal no es producir madera. La evolución de su comportamiento ante el ciclo del agua, se debe programar a largo plazo y sin esperar resultados inmediatos.

Para terminar, señalar que las cuencas vertientes de las áreas de montaña de América Latina tienen sus peculiaridades, que hay que estudiar y tenerlas en cuenta; porque si bien el conocimiento de la comunidad científica es universal, su aplicación, en la que no solo interviene la ciencia, debe ser particular, para conseguir que resulte efectiva.

7. BIBLIOGRAFÍA Y DOCUMENTOS CONSULTADOS

- Aguiló Bonnín J.** (1976) *Evaluación de inversiones en la ordenación agro-hidrológica de cuencas*, pp. 72, ICONA, Servicio de Publicaciones del Ministerio de Agricultura, Madrid.
- Allúe Andrade J. L.** (1966) *Mapa de sub-regiones fito-climáticas de España*, I.F.I.E. (Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias), Madrid.
- Allúe Andrade J. L.** (1990) *Atlas fito-climático de España.- Taxonomías*, pp. 223, I.N.I.A. (Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias), Madrid.
- Andréassian V.** (2004) Waters and Forests: from historical controversy to scientific debate, *Journal of Hydrology* num. 291, pp 1-27
- Andrich A.; Cavalli R.; D'Agostino V.; Mantovani D.** (2000) *Le opere in legno nella sistemazione dei torrenti montani*, pp.139, A.R.A.V., Centro di Arabba, Regione del Veneto.
- Austin Miller A.** (1957, 2ª edición en español) *Climatología*, Ediciones Omega, Barcelona.
- Blaney H. F. & Criddle W. D.** (1950) Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data, *USDA Division Irrigation and Water Conservation*, SCS TP-96, August.
- Bates C. G. & Henry A. J.** (1928) Forest and stream flow at Wagon Wheel Gap, Colorado. *Monthly Weather Review Supplement* num. 30, pp 1-79.
- Becquerel, A. C.** (1853) *Des climats et de l'influence qu'exercent les sols boisés et non boisés*, pp. 366, Firmin Didot frères, Paris.
- Belgrand E.** (1853) De l'influence des forêts sur l'écoulement des eaux pluviales. *Annuaire de la Société Météorologique de France* 1, pp. 176-193.
- Belgrand E.** (1854 a) De l'influence des forêts sur l'écoulement des eaux, *Annales des Ponts et Chaussées* (61), pp. 1-27.
- Belgrand E.** (1854 b) De l'influence des forêts sur l'écoulement des eaux pluviales, *Annuaire de la Société Météorologique de France*, 2, pp. 81-87.
- Bennet H. H.** (1939) *Soil Conservation*, Mac Graw-Hill Co., pp. 993, New York.
- Beschta, R. L., Pyles, M. R., Skaugset, A. E., Surfleet, C. G.** (2000) Peak-flow responses to forest practices in the western Cascades of Oregon, USA. *Journal of Hydrology* num. 233, pp. 102-120
- Bonell M. & Bruijnzeel L. A., eds.** (2005) *Forests, water and people in the humid tropics: Past, present and future hydrological research for integrated land and water management*, pp. 944, Published by Cambridge University Press, U, K., UNESCO.
- Bosch J. M. & Hewlett J. D.** (1982) A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration, *Journal of Hydrology* num. 55, pp. 3-23.
- Boussingault J. B.** (1837) Mémoire sur l'influence des défrichements dans la diminution des cours d'eau, *Annales de Chimie* 64, pp. 113-141.
- Bruijnzeel L. A.** (1989) (De)forestation and dry season flow in the tropics: a closer look. *Journal of Tropical Forest Science*, num. 1, pp. 229-243.
- Bruijnzeel L. A. & Critchley W. R. S.** (1994) Environmental impacts of logging moist tropical forest, *IHP Humid Tropic Programme*, Series num. 7, pp. 48, Paris, UNESCO.
- Bruijnzeel L. A. & Hamilton L. S.** (2000) Decision Time for Cloud Forests, *IHP Humid Tropic Programme*, Series num. 13, Paris, UNESCO.
- Bruijnzeel L. A.** (2004) Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees?, *Agriculture Ecosystems and Environment*, num. 104, pp. 185-228, Elsevier.
- Bruijnzeel L. A.; Bonell M.; Gilmour D. A.; Lamb D.** (2005) Conclusion: Forests, water and people in the humid tropics: an emerging view, From *Forests, water and people in*

- the humid tropics: Past, present and future hydrological research for integrated land and water management*, Bonell M. & Bruijnzeel L. A., eds. Cambridge University Press UNESCO, pp. 906-925.
- Calder I. R.; Rosier P. T. W.; Prasanna K. T.; Parameswarappa S.** (1997) Eucalyptus water use greater than rainfall input—a possible explanation from southern India, *Hydrological Earth System Science*, I, pp.249-256.
- Calder I. R.** (1998) Water use by forests: limits and controls, *Tree Physiology*., num. 18, pp.625-631.
- Calder I. R.** (1999) *The Blue Revolution, Land use and Integrated Water Resources Management*, pp. 192, Earthscan Publications Ltd., London.
- Calder I. R.** (2002) Forest and hydrological services: reconciling public and science perceptions. *Land Use and Water Resources Research*, num. 2, pp. 2.1-2.12.
- Catalina Mimendi M. A. & Vicente Fernández C.** (2000) La infiltración en suelos. Desarrollo para la defensa de ciudades, Ponencia en las Jornadas de Selvicultura Ibérica: El bosque como defensa contra la sequía y las inundaciones, Casabermeja, Málaga, 10-12 noviembre, *Cuadernos de Forestalia*, núm. 1, pp. 55-80.
- Catalina Mimendi M. A. & Vicente Fernández C.** (2002) *Hidrología Forestal de la provincia de Málaga*, Monografía núm. 18, pp. 365, Servicio de Publicaciones de la Diputación de Málaga, España.
- Cézanne, E.** (1872) *Suite de l'étude sur les torrents des Hautes-Alpes*, pp. 382, Dunod, Paris.
- Cosandey C.** (1990) Etude des crues Cévenoles: conditions d'apparition dans un petit bassin versant forestier sur the versant sud du Mont Lozère, *IAHS Publication* n°191, pp. 103-115.
- Cosandey C.** (1993) Forêt et écoulements: Rôle de la forêt sur la formation des crues et le bilan d'écoulement annuel, Impact d'une coupe forestière, CNRS, Meudon
- Cosandey C.** (1995) La forêt réduit-elle l'écoulement annuel?, *Annales de Géographie* 581-582, 7-25.
- Champion, M.** (1858) *Les inondations en France depuis le VIe siècle jusqu'à nos jours*, Vol. 1. Victor Dalmont ed., Paris, (re-edited in 2002 by CEMAGREF, pp. 244.
- De Palacio** (coordinador) (1999) *La restauración hidrológico-forestal en España: Gestión sostenible de los recursos suelo, agua y vegetación*, pp. 75, Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Ministerio de Medio Ambiente.
- Dirección General del Medio Ambiente** (1985) *Metodología para la evaluación de la erosión hídrica*, Serie Documentación del MOPU, pp. 150, Madrid.
- Eichert B. S.** (1982) *HEC-2, Water surface profiles. Users manual*, Program 723-x6-1202A.
- Emmet W. W.** (1970) The Hydraulics of overland Flow on Hill-slopes, *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 662-A, pp. 68, US Government Printing Office, Washington D.C.
- Engler A.** (1919) Untersuchungen u"ber den Einfluß des Waldes auf den stand der Gewässer, pp. 626, Kommissionsverlag Beer, Zürich.
- Engman T.** (1986) Roughness coefficients for Routing surface Runoff, *Transactions of the ASCE*, pp. 39-53.
- Fournier F.** (1960) *Climat et érosion*, pp. 201, Presses Universitaires de France, Paris.
- Gandullo J. M.; Serrada R.** (1977) *Mapa de productividad potencial forestal*, Colección Monografías INIA, núm. 16, pp. 23, Madrid.
- Gandullo J. M.** (1984) *Clasificación básica de los suelos españoles*, pp. 63, Fundación Conde del Valle de Salazar. E. T. S. I. Montes. Madrid.
- Gandullo J. M.** (1985) *Ecología Vegetal*, pp. 208, Fundación Conde del Valle Salazar, E. T. S. Ingenieros de Montes, Madrid.

- Gandullo J. M.; Sánchez Palomares O.** (1994): *Estaciones ecológicas de los pinares españoles*, Colección Técnica, ICONA, MAPA, pp. 188, Madrid.
- García Díaz R.; Mintegui J. A.; Robredo** (2002) La caracterización del movimiento del agua en laderas, como instrumento de zonificación de los usos del suelo en cuencas de montaña, *Ecología*, núm. 16, pp. 9-25, Organismo Autónomo Parques Nacionales, Madrid
- García Nájera J. M.** (1943, 1962) *Principios de Hidráulica Torrencial y sus aplicaciones a la corrección de torrentes*, Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias I. F. I. E., pp. 297, Madrid.
- García Nájera J. M.** (1954) *Pendientes máximas admisibles en las tierras de cultivo y cálculo de las terrazas intermitentes con desagüe para la conservación del suelo (banquetas de infiltración)*, I. F. I. E., pp. 29, Madrid
- García Nájera J. M.** (1955) *El bosque, el agua y la conservación del suelo, pendiente máxima admisible en los pastizales*, I. F. I. E., pp. 7, Madrid
- Gausson H.** (1955) Détermination des climats par la méthode des courbes ombra-thermiques, C.R.A.S.C., t 240, Paris.
- Hewlett J. D.** (1971) Comments on the catchment experiment to determine vegetal effects on water yield. *Water Resources Bulletin* num. 7 (2), pp. 376-381.
- Hewlett J. D.** (1982) *Principles of Forest Hydrology*, pp. 183, The University of Georgia Press, Athens.
- Hibbet A. R.** (1967) Forest treatment effects on water yield. In Sopper W. E. Lull H. W. (eds.) *Forest Hydrology, Proceedings of a National Science Foundation at Advanced Science Seminar*, Pergamon Press, Oxford, pp. 527-543.
- Hibbet A. R.** (1971) Increases in stream flow after converting chaparral to grass, *Water Resources Research*, num. 7 (1) pp. 71-80.
- Hibbet A. R.; Davis E. A.; Brown T. C.** (1975) Managing chaparral for water and others resources in Arizona, Watershed Management Symposium, ASCE, Longan, Utah, pp. 445-468.
- Hubert A. & Iroume A.** (2001) Variability of annual rainfall partitioning for different sites and forest covers in Chile, *Journal of Hydrology* num. 248(1-4), pp. 78-92
- ICONA - INTECSA** (1988) *Agresividad de la lluvia en España, Valores del factor R de la U. S. L. E.*, ICONA, MAPA, pp. 39 y mapas, Madrid.
- ICONA** (1987-93) *Mapas de Estados Erosivos* (adaptados a las superficies de cada una de las Confederaciones Hidrográficas de España), Publicaciones del MAPA.
- Ingwersen, J.B.** (1985) Fog drip, water yield, and timber harvesting in the Bull Run municipal watershed, Oregon, *Water Resources Bulletin* num. 21 (3), pp. 469-473.
- Iroume A. & Hubert A.** (2002) Comparison of interception losses in a broadleaved native forest and a *Pseudotsuga menziesii* plantation, *Hydrological Processes* num.16(12), pp. 2347-2361.
- Jarrett D.** (1990) Hydrologic and Hydraulic Research in Mountain Rivers, *Water Resources Bulletin*, A.W.R.A., Vol. 26, num. 3, pp. 419-429.
- Jeandel F., Cantégril J. B., Bellaud L.** (1862) Etudes expérimentales sur les inondations, *Bureau des Annales Forestières*, pp. 144, Paris.
- Johnson, R.** (1998) The forest cycle and low river flows: a review of UK and international studies, *Forest Ecology and Management* 109.
- Kao D. T. & Barfield B. J.** (1978), Predictions of Flow Hydraulics for vegetated channels, *Transactions of the ASAE* 21 (3), pp. 489-494.
- Kao D. T. & Barfield B. J.** (1982) Flow Reentrance in Vegetated Channels, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering Division*, ASCE IR2, pp 329-342.

- Kittredge, J.** (1948) *Forest Influences: the Effects of Woody Vegetation on Climate, Water and Soil, with Applications to the Conservation of Water and the Control of Floods and Erosion*, McGraw Hill, pp. 394, New York.
- Kuczera G.** (1987) Prediction of water yield reductions following a bushfire in ash-mixed species eucalypt forest. *Journal of Hydrology*, num.94, pp. 215-236.
- Lamarck J. B.** (1820) *Système analytique des connaissances positives de l'homme*, pp. 364, Chez l'Auteur et Berlin, Paris.
- Langford, K.J., Mc Guinness, J.L.** (1976) A comparison of modelling and statistical evaluation of hydrologic change, *Water Resources Research*, num. 12 (6), pp. 1322–1324.
- Lenzi M. A.; D'Agostino V.; Sonda D.** (2000) *Ricostruzione Morfologica e Recupero Ambientale dei Torrenti*, pp. 208, Editoriale Bios, Italy
- Lenzi M. A. (edited)** (2000) Dynamic of water and sediments in mountain basins, *Quaderni di idronomia montana*, special issue, num. 20, pp. 266, Editoriale Bios, Italy.
- Lenzi M. A.; Comiti F.; Mao L.; Andreoli A.; Pecorari E.; Rigon E. y Picco L.** (2007) *El control de detritos leñosos y el manejo de la vegetación en el cauce (Best practice guidelines for dealing with large wood debris)*, pp. 175, Deliverable D22, Equipo del Proyecto EPIC FORCE de la Universidad de Padova (Italia).
- López Cadenas de Llano F.; Blanco Criado M.** (1968) *Aspectos cualitativos y cuantitativos de la erosión hídrica y del transporte y depósito de materiales*, I.F.I.E., pp. 187, Madrid
- López Cadenas de Llano F.; Blanco Criado M.** (1978) *Hidrología Forestal* (segunda parte) Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, pp. 134, Madrid.
- López Cadenas de Llano F.; Mintegui Aguirre J. A.; Pérez-Soba Baró A.** (1985) Metodología integrada para la determinación de los sedimentos aportados por una cuenca, *Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt*, núm. 156, pp. 143-161.
- López Cadenas de Llano F.** (1988) *Corrección de torrentes y estabilización de cauces*, Colección FAO, Fomento de tierras y aguas, pp. 182, Roma.
- Mathieu A.** (1878) *Météorologie comparé agricole et forestière*, pp. 70, Imprimerie Nationale, Paris.
- McCulloch J. S. G. & Robinson, M.** (1993) History of forest hydrology, *Journal of Hydrology*, num. 150, pp. 189–216..
- Mc Guinness, J. L. & Harrold, L.** (1971) Reforestation influences on small watershed streamflow, *Water Resources Research*, num. 7 (4), pp. 845–852.
- Mintegui Aguirre J. A.; López Unzu F.** (1990) *La Ordenación agro-hidrológica en la planificación*, Servicio de Publicaciones del Gobierno Vasco, pp. 306, Vitoria.
- Mintegui Aguirre J. A.** (1991) El papel del bosque de montaña: Aspectos técnicos, Actas del X Congreso Forestal Mundial (Paris), *Revue Forestière Française*, Hors Serie, núm. 3, pp.171-180.
- Mintegui Aguirre J. A.; De Simón Navarrete E.; García Rodríguez J. L.; Robredo Sánchez J. C.** (1993) *La restauración hidrológico-forestal de las cuencas hidrográficas de la vertiente mediterránea*, Junta de Andalucía, Consejería de Agricultura y Pesca, pp. 325, Sevilla.
- Mintegui Aguirre J. A.; Robredo Sánchez J. C.** (1993) *Métodos para la estimación de los efectos torrenciales en una cuenca hidrográfica.- Manual para un programa básico*, Fundación Conde del Valle de Salazar, ETS Ingenieros de Montes, pp. 83, Madrid.
- Mintegui Aguirre J. A.; Robredo Sánchez J. C.** (1994) Caracterización de las cuencas hidrográficas, objeto de restauración hidrológico-forestal, mediante modelos hidrológicos, *Revista Ingeniería del Agua*, Vol.1 núm. 2, pp. 69-82.

- Mintegui Aguirre J. A.; Robredo Sánchez J. C.** (2006) Delimitación de los objetivos de proyecto EPIC FORCE en la ordenación agro-hidrológica de cuencas, EPIC FORCE, Nota Técnica N° 1, pp. 6.
- Molchanov A. A.** (1960; 1963, traducido al inglés; 1966, 2ª edición inglesa) *The hydrological role of forests*, pp. 407, Academy of Science of the U.R.S.S. (traducido por A. Gourevitch, Israel Program for Scientific Translation).
- Montero de Burgos J. L.; González Rebollar J. L.** (1974) *Diagramas Bioclimáticos*, ICONA, MAPA, pp. 379, Madrid.
- Navarro Garnica M.**, editor (1975) *Técnicas de reforestación*, Monografía núm. 9, ICONA, MAPA, pp. 211, Madrid.
- Nezu I. & Onitsuka K.** (1999) 3 D Turbulent Structures in partly vegetated open channel flows, pp. 305-310, *Environment Hydraulics*, Lee, Jayawardena and Wang (eds.) Balkema, Rotterdam.
- Nicolás A.; Gandullo J. M.** (1964) *Contribución al estudio de las estaciones forestales*, I.F.I.E., pp. 52, Madrid.
- Nicolás A.; Gandullo J. M.** (1966) *Los estudios ecológicos selvícolas y los trabajos de repoblación forestal*, I.F.I.E., pp. 107, Madrid.
- Pavari, A., De Philippis, A.** (1941) *La sperimentazione di specie forestali esotiche in Italia. Risultati del primo ventennio*, pp. 646, Stazione Sperimentale di Selvicoltura, Firenze. Roma (Italia)
- Penmam H. L.** (1948) Natural evaporation from open water, bare soil and grass, *Proceeding of the Royal Society*, London, A 193, pp 120-146.
- Penmam H. L.** (1963) *Vegetation and Hydrology*, pp.124, Franham Royal Book, C.A.B. (Commonwealth Agricultural Bureaux), London.
- Ponce V. M.** (1989) *Engineering Hydrology. Principles and practices*, pp 640, Prentice Hall, New Jersey
- Rauch F.A.** (Editor) (1821-1825) *Annales Européennes et de Fructification Générale*, Paris
- Roberts S.; Vertessy R. A.; Grayson R. B.** (2001) Transpiration from *Eucalyptus sieberi* (L. Johnson) forests of different age. *Forest Ecology and Management*, num. 143, pp. 153-161.
- Robinson, M., Gannon, B., Schuch, M.** (1991) A comparison of the hydrology of moorland under natural conditions, agricultural use and forestry, *Hydrological Sciences Journal*, num. 36 (6), pp. 565-577
- Robredo Sánchez J. C.** (1994) Modelo para la ordenación de cuencas hidrográficas torrenciales, encaminado a la planificación de los trabajos y obras para su restauración hidrológico-forestal, Tesis Doctoral, pp. 368 y 1 tomo de Anexos, Departamento de Ingeniería Forestal, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid.
- Robredo Sánchez J. C.; Mintegui Aguirre J. A.** (1994) Diseño de un modelo distribuido elemental para el análisis del comportamiento hidrológico de una cuenca vertiente, *Revista Ingeniería del Agua*, Vol.1 núm. 4, pp. 79-100.
- Rojo Núñez I.** (2004) Modelo para estimar las disponibilidades hídricas en una cuenca de carácter forestal. Aplicación a las cuencas de los ríos Moros y Riaza (Segovia), Tesis Doctoral, pp. 215, Departamento de Ingeniería Forestal, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid.
- Sarandón, R., Gaviño Novillo, M., Guerrero Borges, V.** (2006) Factors affecting the occurrence of Hydrological events and subsequent damages, EPIC FORCE, Draft Technical Note N° 2, pp. 7.

- Scott, D.F., Lesch, W.** (1997) Streamflow responses to afforestation with *Eucalyptus grandis* and *Pinus patula* and to felling in the Mokobulaan experimental catchments, South Africa, *Journal of Hydrology* num. 199, pp. 360–377.
- Serrada R.; Mintegui J. A.; Robredo J. C.; García J. L.; Gómez V.; Zazo J.; Navarro R.** (1997) Formación de escorrentías con lluvias torrenciales simuladas, en parcelas con diferentes cubiertas vegetales y distintas preparaciones del suelo para las repoblaciones forestales. *Libro de Actas del I Congreso Forestal Hispano Luso y II Congreso Forestal Español*, Tomo II, pp. 605-610, Pamplona.
- Serrada R.; Mintegui J. A.; García J. L.; Gómez V.; Robredo J. C.; Zazo J.** (1998) A method for simulating torrential rainfall in experimental plots for the analysis of the hydrological behaviour of different types of plant cover and the systematic preparation of soil for reforestation, *The soil as a strategic resource: Degradation processes and Conservation Measures*, Geoforma Ediciones, pp. 165-176, Logroño.
- Surrel A.** (1841) *Etude sur les torrents des Hautes Alpes*, Carilian-Goeury et Victor Dalmont, pp. 283, Paris.
- Swank W. T.; Vose J. M.; Elliott K. J.** (2001) Long-term hydrologic and water quality responses following commercial clear-cutting of mixed hardwoods on southern Appalachian catchment, *Forest Ecology and Management*, num. 143, pp. 163-178.
- Swift L. W.; Swank W. T.** (1981) Long-term responses of stream-flow following clear-cutting and regrowth, *Hydrological Sciences Bulletin*, num. 26 (3), pp. 245-256.
- Temple D. M.** (1980) Tractive force design of vegetated channels linings, *Transactions of the ASAE*, num. 23 (4), pp. 884-890
- Temple D. M.** (1982) Flow retardance of submerged grass channel linings, *Transactions of the ASAE*, num. 25 (5), pp. 1300-1303
- Temple D. M.** (1983) Design of grass-lined open channels, *Transactions of the ASAE*, pp. 1064-1069.
- Thiery E.** (1891, 1914,) *Restauration des montagnes, correction des torrents et reboisement*, Librairie Polytechnique Ch. Beranger, pp. 480, Paris et Liege.
- Thornthwaite C. W.; Holzman B.** (1939) The determination of evaporation from land and water surfaces, *Monthly Weather Rev.*, Vol. num. 67, pp 4-11.
- Thornthwaite C. W.** (1943-44) Report on the Committee on Transpiration and Evaporation, *Translation American Geophysical Union*, part V, pp. 686-693.
- Thornthwaite C. W.** (1948) An approach toward a rational classification of climate, *Geograph Rev.* Vol. num 38, pp 55-94.
- Thornthwaite C. W.; Mather, J. R.** (1955) *The water balance*, Publ. Climatol., Lab. Climatol., Drexel. Inst. Technol. 8(1), pp 1-104.
- Troendle, C.A., King, R.M.** (1985) The effect of timber harvest on the Fool Creek watershed, 30 years later, *Water Resources Research*, num. 21 (12), pp. 1915–1922
- Turc L** (1961) Evaluation des besoins en eau d'irrigation: évapotranspiration potentielle, *INRA, Ann. Agron.*, núm. 12, pp 13-46.
- U. S. Army Corps of Engineers** (1981) *HEC-1, Flood hydrograph package. Users manual*, Water Resources Support Centre, Hydrologic Engineering Centre. 723-x6-12010.
- U. S. D. A. Agricultural Research Service S.9** (1973) *H.Y.M.O: Problem oriented computer language for hydrologic modelling*, Texas University, pp. 76.
- Vallès F.** (1857) *Etudes sur les inondations, leurs causes et leurs effets*, pp. 528, Victor Dalmont, Paris.
- Vallès F.** (1862) Etudes expérimentales sur les inondations. *Annales des Ponts et Chaussées* (33), pp. 177-210.
- Vallès F.** (1865) *De l'aliénation des forêts aux points de vue gouvernemental, financier, climatologique et hydrologique*, pp. 184, Dunod, Paris.

- Varios Autores; López Cadenas de Llano F.**, director, (1994, 1998) *Restauración Hidrológico-Forestal de cuencas y Control de la erosión*, pp. 929, Ministerio de Medio Ambiente, Tragsa y Tragsatec, Ediciones Mundi Prensa, Madrid.
- Walter H. & Lieth H.** (1960) *Klimadiagramm Weltatlas*, Veb Gustav Fischer, Jena.
- Vernet J. L.** (1966) Sur un indice bioclimatique applicable aux climats de la France, *Naturalia Monspeliensia*, Serie Botanique núm. 17, Montpellier.
- Vertessy, R.A., Benyon, R.G., O'Sullivan, S.K., Gribben, P.R.** (1995) Relationships between stem diameter, sapwood area, leaf area and transpiration in a young mountain ash forest. *Tree Physiology*, num. 15, pp. 559–567.
- Vertessy, R.A., Hatton, T.J., Reece, P., O'Sullivan, S.K., Benyon, R.G.** (1997) Estimating stand water use of large mountain ash trees and validation of the sap flow measurement technique, *Tree Physiology*, num. 7 (12), pp. 747–756.
- Vertessy, R.A., Watson, F., O'Sullivan, S.K.** (2001) Factors determining relations between stand age and catchment water balance in mountain ash forests, *Forest Ecology and Management*, num. 143, pp. 13–26.
- Watson, F., Vertessy, R.A., McMahon, T.A., Rhodes, B., Watson, I.** (2001) Improved methods to assess water yield changes from paired-catchment studies: application to the Maroondah catchments, *Forest Ecology and Management*, num. 143, pp. 189–204.
- Williams J. R.; Hann R. W.** (1973) *HYMO: Problem oriented computer language for hydrologic modelling, Users Manual*, U.S. Department of Agriculture, A. R. S. and Texas University, pp. 76.
- Williams J. R.** (1975) Sediment-yield prediction with Universal Equation using run-off energy factor, *Agricultural Research Service (A.R.S.)* num. 40, U.S.A. Department of Agriculture, pp. 244-252.
- Williams J. R.** (1975) Sediment routing for agricultural watersheds, *Water Resources Bulletin*, American Resources Association Vol. 11, num. 5, pp 965-974.
- Wischmeier W.H.** (1959) A rainfall erosion index for a Universal Soil Loss Equation. *Proceeding Soil Scientific Society of America* 23, Madison, Wisconsin, pp. 246-249.
- Wischmeier W.H.** (1960) Cropping-management factor evaluation of a Universal Soil Loss Equation. *Proceeding Soil Scientific Society of America* 24, Madison, Wisconsin, pp. 322-326.
- Wischmeier W.H., Smith D.D.** (1972) Soil-loss estimation as a tool in soil and water management planning, *Int. Assoc. Sciences Hydrology (I.A.S.H.)*, num.59, Belgrade pp 148-159.
- Wischmeier W.H.** (1974) A new developments in estimating water erosion. *29^{end} Annual Meeting of the Soil Conservation Society of America*, Ankeney, Iowa, pp. 179-186.
- Zon R.** (1927) *Forests and water in the light of scientific investigation*, U. S. Nat. Waterways