UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA. FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS.
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA Y ORDENACIÓN DEL TERRITORIO.

EVALUACIÓN DE PROCESOS DE EROSIÓN EN PISTAS FORESTALES NO PAVIMENTADAS DE ÁREAS DE MONTAÑA (SISTEMA IBÉRICO NOROCCIDENTAL)

VÍCTOR LARREA SÁENZ

JULIO 2004



ISBN 978-84-692-5515-5

Reservados todos los derechos
© El autor
Universidad de La Rioja

Logroño, 2009

Universidad de La Rioja
Biblioteca Universitaria
C/ Piscinas s/n
26006 LOGROÑO
LA RIOJA – ESPAÑA

E-mail: dialnet@unirioja.es
Página web: dialnet.unirioja.es

EVALUACIÓN DE PROCESOS DE EROSIÓN EN PISTAS FORESTALES NO PAVIMENTADAS DE ÁREAS DE MONTAÑA (SISTEMA IBÉRICO NOROCCIDENTAL)

Universidad de Zaragoza

Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio

Memoria presentada en el Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza por D. Víctor Larrea Sáenz para optar al Grado de Doctor en Geografía por la Universidad de Zaragoza.

Dirigida por el Doctor Don José Arnáez Vadillo.

Zaragoza, julio de 2004

A los que me dieron la oportunidad de ser,
a los que me han ayudado a recorrer el camino,
a Ana y Jorge con quienes espero compartir
el mayor tiempo posible.

EVALUACIÓN DE PROCESOS DE EROSIÓN EN PISTAS FORESTALES NO PAVIMENTADAS DE ÁREAS DE MONTAÑA (SISTEMA IBÉRICO NOROCCIDENTAL)

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por tres proyectos de Ayudas a la Investigación del Instituto de Estudios Riojanos en las convocatorias de: 1990, *Evolución geomorfológica de pistas forestales (Sistema* Ibérico, La Rioja); 1995, *Procesos de arroyamiento y recolonización vegetal en pistas forestales* y 2002, *Distribución de pistas forestales a partir de factores ambientales y movimientos en masa en el Sistema Ibérico riojano*. También mediante una Licencia por Estudios (2002-2003) para la finalización de Tesis, obtenida de la Consejería de Educación, Cultura y Deporte del Gobierno de La Rioja. Nuestro más sincero agradecimiento a estas instituciones.

Agradecimientos

Esta Tesis no hubiera sido posible sin la colaboración desinteresada de una serie de personas que no pueden estar ausentes en estas líneas. No olvido a aquellos familiares y amigos que me han facilitado, directa o indirectamente, la realización del trabajo de campo a lo largo de todos estos años. Especialmente a mi mujer Ana que siempre ha estado ahí para la toma de datos, cuando ya me había quedado sólo. Ha sido, sin duda, el principal apoyo y quien más ha tenido que padecer este esfuerzo. También debo mencionar a los familiares que han cuidado de nuestro Jorge estos últimos veranos, cuando los dos trabajábamos en el monte; a Carmelo, quien me ayudó y preparó los programas para el tratamiento de los datos de procesos y perfiles; a mis primos Alfredo, Luis y Diego; a Pablo por su participación en el trabajo de campo; a Roberto por sus observaciones sobre el cálculo de volúmenes; a Ignacio, Miguel y Miguel Ángel. También agradezco la colaboración, los consejos y orientaciones de Luis Ortigosa Izquierdo en cuestiones de análisis multivariante y de SIG y, por supuesto, del Director de la Tesis, José Arnáez Vadillo. A pesar del paso de los años siempre ha confiado en llevar a buen término este proyecto.

Un buen estímulo han sido las ayudas a la investigación que me concedió el Instituto de Estudios Riojanos (Gobierno de La Rioja) en las convocatorias 1990 *(Dinámica geomorfológica en pistas forestales de áreas de montaña)*, 1995 *(Procesos de arroyamiento y recolonización vegetal en pistas forestales: el caso de la pista de Santa Marina)* y 2002 *(Pistas forestales y movimientos en masa en el Sistema Ibérico riojano)*, así como la licencia por estudios obtenida en el curso 2002-2003, sin las que esta Tesis tampoco habría podido ver la luz.

Cabe agradecer también la colaboración de: ingenieros como Jesús Laría, Patricia Llundai, de la Dirección General de Montes, Sebastián Soto, de la Oficina de Supervisión de Proyectos de la Comunidad Autónoma de La Rioja; Gonzalo López, responsable de la Sección de Sistemas de Información Geográfica y de la, recién creada, Dirección General de Política Territorial, sin la que nunca habría obtenido la capa de pistas forestales en la persona de su directora, María Martín Díez de Baldeón; y del Laboratorio de análisis de suelos de La Grajera. Por último, mención especial merecen la Universidad de La Rioja, el Servicio de Innovación Educativa de la Dirección General de Educación y la Sociedad de Montaña Sherpa, que me facilitaron parte del material técnico necesario en los trabajos de campo.

íNDICE

ÍNDICE ABREVIADO

1.- INTRODUCCIÓN 0

1. Definición del problema 1
1.1. Las pistas forestales y su incidencia socioeconómica 7
1.2. Impactos de las pistas forestales en el medio natural 8
1.3. Efectos hidrogeomorfológicos de las pistas forestales 11
2.- Estado de la cuestión 17
3.- Objetivos del estudio 22
4.- Esquema del trabajo 23

2.- MÉTODOS 26

2.1.Recopilación de bibliografía especializada 27
2.2. Selección de las pistas forestales a estudiar 27
2.3. Variedad y distribución de las formas y procesos de erosión 28
2.4. Cuantificación de la erosión por escorrentías superficiales 45
2.5. Movimientos en masa 48
2.6. Cartografía de riesgos por movimientos en masa 53

3.- ÁREA DE ESTUDIO 57

3.1. Descripción general del Sistema Ibérico riojano 59
3.2. Sierra de la Demanda 66
3.3. Sierra de Cebollera y Camero Nuevo 69
3.4. El conjunto montañoso oriental 71
3.5. Las pistas forestales en la montaña riojana 76
3.5.1. Caracteres generales de la red de pistas forestales de la montaña riojana 78
3.5.2. Distribución de las pistas forestales según variables geoecológicas 85

ÍNDICE ABREVIADO

4.- CARACTERÍSTICAS DE LAS PISTAS SELECCIONADAS 88

4.1.- Descripción general 90
4.1.1. Pista de Valgañón-Ezcaray 90
4.1.2. Pista de Hoyos de Iregua 92
4.1.3. Pista de Nieva-Gamellones 95
4.1.4. Pista de Zenzano 97
4.1.5. Pista de Santa Marina 101
4.1.6. Pista de Cornago-Sierra de Alcarama 103
4.1.7. Pista de La Villa de Ocón-Arnedillo 105

4.2.- Morfometría y recubrimiento vegetal 108
4.2.1. Morfometría de las pistas 108
4.2.2. Tipología y clasificación de taludes 112
4.2.3. Cubrimiento vegetal de los taludes 116

5.- PROCESOS DE EROSIÓN EN PISTAS FORESTALES 127

5.1. La erosión en la calzada de la pista 130
5.1.1. Arroyamiento concentrado: incisiones 130
5.1.2. Impacto de gotas de lluvia ("splash") y erosión laminar 136
5.1.3. Cunetas y drenajes en las pistas forestales 142
5.1.3. Otros procesos de erosión 147

5.2.- La erosión en los taludes de las pistas forestales 149
5.2.1. Tipología y distribución de los procesos y formas de erosión 149
5.2.2. Factores de control en la distribución de los microambientes geomorfológicos 155
5.2.3. Impacto de gotas de lluvia ("*splash*") y escorrentía

ÍNDICE ABREVIADO

superficial en los taludes de pistas forestales 160

a.- Cuantificación del impacto de las gotas de lluvia y escorrentía superficial 160
b.- Comportamiento temporal de la escorrentía superficial 167

5.2.4. Movimientos en masa 177
5.2.4.1. Caracterización y distribución 179
5.2.4.2. Material movilizado 182
5.2.4.3. Probabilidad y métodos de cálculo para movimientos en masa 184
5.2.4.4. Factores de control en los movimientos en masa 188
5.2.4.5. Grupos de movimientos en masa 198
5.2.4.6. Zonas críticas en los taludes 204

5.3. Aproximación a la evaluación del riesgo por movimientos en masa en pistas forestales 209

5.3.1. Cartografía de variables 209
5.3.1.1. Variables derivadas de la altimetría digital (MDT) ... 215
5.3.1.2. Variables climáticas e hidrológicas 219
5.3.1.3. Cubierta vegetal 224
5.3.1.4. Variables litológicas y geomorfológicas 230
5.3.2. Inestabilidad por movimientos en masa en las unidades de ladera (UL) 231
5.3.3. Riesgo de erosión por movimientos en masa en pistas forestales 236
5.3.4. Conclusiones y valoración de resultados 241

ÍNDICE ABREVIADO

6.- MODELOS DE EROSIÓN EN PISTAS FORESTALES 246

6.1. Tipos de modelos 247
6.2. Los modelos y su funcionamiento integrado 251
6.2.1. Subsistema del talud superior (T1) 251
6.2.2. Subsistema de la calzada de la pista 254
6.2.3. Subsistema del talud inferior (T2) 255

7.- DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES 259

8.- BIBLIOGRAFÍA 281

9.- APÉNDICES 317-347

ÍNDICE DE FIGURAS, FOTOS, MAPAS Y TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figuras:

2.1. Algunas variables morfotopográficas de los transectos estudiados 31
2.2. Elaboración de perfiles de los transectos de las pistas 32
2.3. Levantamiento de perfiles mediante un programa específico diseñado en “basic” 32
2.4. Perfiles de movimientos en masa en los taludes de las pistas forestales 34
2.5. Levantamiento de un perfil transversal de un deslizamiento en la pista de Hoyos de Iregua 51
4.1. Sección de las pistas forestales, datos morfométricos medios 110
4.2. Tipos de perfiles en el corte-talud (T1) y su evolución (perfiles 1, 2 y 3) 114
4.3. Tipos de perfiles en el corte-talud (T1) y su evolución (perfiles 4, 5 y 6) 116
4.4. Cubrimiento vegetal en las pistas forestales en relación con su altitud media. 118
4.5. Secciones consideradas en los taludes de pistas forestales. T1: corte-talud; T2: talud inferior; SA: sector superior del talud; SB: sector medio del talud; SC: pie del talud. 120
5.1. Relación entre la pendiente longitudinal de la calzada de la pista y la profundidad máxima de las incisiones 135
5.2. Evolución de la escorrentía superficial en las pruebas de simulación de lluvia realizadas sobre las calzadas de las pistas forestales 138
5.3. Relaciones entre el coeficiente de escorrentía y las pérdidas de suelo en las calzadas de las pistas forestales 140
5.4. Comportamiento de la concentración de sedimentos en suspensión (CCS) durante la simulación de lluvia 141
5.5. Distribución de los microprocesos de erosión en los taludes de las diferentes pistas forestales estudiadas 154
5.6. Coeficientes de correlación entre los microambientes ocupados por deslizamientos y las características de T1. 157
5.7. Coeficientes de correlación entre los microambientes ocupados por arroyamiento difuso severo y las características de T2. 158
5.8. Evolución de la escorrentía superficial en las pruebas de simulación de lluvia realizadas sobre los taludes de las pistas forestales (cada punto representa el

valor medio de las simulaciones realizadas) 162
5.9. Relación entre el coeficiente de escorrentía y las pérdidas de suelo en las simulaciones realizadas en los cortes-taludes (T1) 165
5.10. Concentración de sedimentos en suspensión (CSS) durante la simulación de lluvia en T1 (corte-talud) y T2 (talud inferior). 166
5.11. Comportamiento estacional de las parcelas experimentales estudiadas (medias del periodo 1992-95). 170
5.12. Relaciones entre los procesos de erosión y acumulación y los días de helada 171
5.13. Recta de regresión que relaciona la precipitación total estacional (mm) y la erosión-acumulación en RT1. 173
5.14. Recta de regresión que relaciona los días con precipitación superior a 10 mm y la erosión-acumulación en RT1. 174
5.15. Probabilidad de ser igualado o excedido un movimiento en masa de un determinado volumen 185
5.16. Relación entre los volúmenes movilizados por los movimientos en masa observados y los calculados a partir de la función 187
5.17. Diagrama de dispersión de los 5 grupos de movimientos en masa en relación con las funciones discriminantes 200
5.18. Distribución del volumen movilizado a lo largo del recorrido de las pistas:
a Valgañón-Ezcaray (P1) 204
b Hoyos de Iregua (P2) 205
c Ocón-Arnedillo (P7) 205
5.19. Perfil de un corte-talud (T1) y un talud inferior (T2) afectados por movimientos en masa en la pista forestal de Hoyos de Iregua (P2) 206
5.20. Bloque diagrama de la cabecera del río Iregua con el recorrido de la pista Hoyos de Iregua. Puede observarse el Castillo de Vinuesa, al fondo, y la Mesa de Cebollera, a la izquierda. 210
6.1. Distribución de procesos de erosión y porcentaje de cubierta vegetal en los taludes de las pistas correspondientes al MODELO 1. 248
6.2. Distribución de procesos de erosión y porcentaje de cubierta vegetal en los taludes de las pistas correspondientes al MODELO 2. 249
6.3. Distribución de microambientes geomorfológicos y porcentaje de cubierta vegetal en los taludes de las pistas correspondientes al MODELO 3. 250
6.4. Esquema de funcionamiento hidrogeomorfológico de los tres subsistemas de las pistas forestales. 252
7.1. Relación entre la escorrentía y las tasas de erosión para cada

sector de las pistas forestales. Cada punto representa la media de las simulaciones. 261
7.2. Escorrentía y erosión a partir de pruebas de simulación de lluvia en áreas con diferente usos del suelo. 263

(1) Corte-talud de pista forestal.
(2) Parcela cultivada de cereales (Lasanta et al., 2000ª).
(3) Campos en pendiente abandonados (Arnáez et al., 1996).
(4) Badlands (Cerdà & García Fayos, 1994).
(5) Terrazas abandonadas (Lasanta et al., 2000b).
(6) Talud inferior de pista forestal.
(7) Calzada de pista forestal.
(8) Laderas con cubierta de matorral (Cerdà, 1994).
(9) Parcela afectada por un incendio (Cerdà, 1993).

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografías:

1.1. Pista forestal con sus diferentes secciones: corte-talud, calzada y talud inferior. Ruptura de la continuidad vegetal, edáfica e hidrogeomorfológica de la ladera.Tramo abierto en Arnedillo 2002. 4
1.2. Pista primaria o arterial Valgañón-Ezcaray (Sierra de la Demanda). Saca de madera en camiones de gran tonelaje. 4
1.3. Pista secundaria en la Sierra de la Demanda (barranco Menárez en Ezcaray). Puede verse el caballón exterior y la reptación generalizada de la ladera. 5
1.4. Trocha abierta por buldozer para la saca de madera en Hoyos de Iregua. Sierra de Cebollera. 5
1.5. Carretera local y trocha abierta para la instalación del tendido eléctrico en el Parque Eólico de Sierra de la Hez (La Rioja). 6
1.6. Pista forestal en la Cruz de la Demanda (Sierra de la Demanda). Tramo en zig-zag asfaltado para el ascenso hasta la línea de cumbres (2.000 m). 6
2.1. Arroyamiento difuso severo en un talud inferior (T2). Pista Santa Marina (P5). 35
2.2. Arroyamiento difuso débil en T1. Pista Ocón-Arnedillo (P7). 35
2.3. Caída de rocas en T1. Pista de Cornago-Alcarama (P6). 36
2.4. Deslizamiento planar en un ramal de la pista Collado Iguareña. Valgañón. 36
2.5. Deslizamiento rotacional. Pista Hoyos de Iregua (P2). 37
2.6. Coladas de barro en T1. Pista forestal de Santa Marina (P5). 37
2.7 Colada de barro y piedras en T2. Pista Hoyos de Iregua (P2). 38
2.8. Incisiones en T1. Pista Santa Marina (P5). Zona de instalación de clavos en rigola e interrigola. 39
2.9. Pipkrakes en T1 de la pista Valgañón-Ezcaray (P1). 40
2.10. Talud superior con fuerte pendiente afectado por pipkrakes en la pista Valgañón-Ezcaray (P1). 40
2.11. Caída de tepés en T2. Pista Valgañón-Ezcaray (P1). 40
2.12. Acarcavamiento en T1 e incisión transversal en la calzada. Pista Zenzano (P4). 42
2.13. Incisiones longitudinales que siguen la rodadura en la calzada (P4). 42
2.14. Mediciones en las agujas de erosión instaladas en T1. Pista de Sta. Marina (P5). 43
2.15. Sector estudiado con la instalación de clavos de erosión en T2.

Pista Santa Marina (P5). 43
2.16. Simulador de lluvia utilizado en las pruebas. 44
2.17. Microparcela para la simulación de lluvia en el sector superior de T2. 44
2.18. Deslizamiento planar en Hoyos de Iregua. P2-TS10. 48
2.19. El mismo deslizamiento semanas después. Verano 2002 48
2.20. Invasión de la calzada o retroceso de un deslizamiento en T1. Hoyos de Iregua. 52
3.1. Depresión del Valle del Ebro, rampas de conexión y la Demanda al fondo 61
3.2. Circo con perfil transversal en artesa en la cabecera del río Portilla.
Picos de Urbión. 61
3.3. Circo inferior de La Gamella, vertiente oriental de La Mesa de Cebollera 62
3.4. Plataforma calcárea de los Gamellones con el Moncayo al fondo 62
3.5. Macizo paleozoico de La Demanda con predominio de materiales
cámbricos 74
3.6. Vista del Camero Viejo. Materiales de fase Purbeck-Weald entre
los valles Leza y Jubera. Aldea de Antoñanzas. 74
3.7. Pistas de línea de cumbres de la Demanda. Vertiente meridional
del San Lorenzo 1900 m de altitud. 75
3.8. Pista de ladera inferior en Cornago para la construcción de una presa 75
3.9. Pista principal y tramos secundarios. Trazado dendrítico alrededor de
Cabimonteros. Ocón-Arnedillo (P7). 82
3.10. Antigua pista hoy paso asfaltado con trazado en zig-zag entre Ortigosa
y Brieva de Cameros. 82
3.11. Pista de línea de cumbres y de cabecera del valle del Jubera.
Interfluvio Leza-Jubera. 84
3.12. Tramo de ascenso a la línea de cumbres anterior desde Munilla. 84
4.1. Tramo en ladera media de fuertes pendientes en el descenso hacia
Santa Barbara. Pista Valgañón-Ezcaray (P1). 93
4.2 Troncos apilados en un tramo en vaguada de la pista Hoyos de Iregua (P2). 93
4.3. Tramo de la pista de Nieva-Gamellones (P3) en el que se puede observar
el mal estado de la calzada y algunos procesos de erosión en los taludes. 99
4.4. Detalle de los taludes superiores de las pista de Zenzano (P4). 99
4.5. Pista forestal de Santa Marina (P5) en la que se observa las dimensiones de
la calzada. 100
4.6. Tramo alto de la pista Cornago-Sierra de Alcarama (P6) entre repoblaciones
forestales. 100
4.7. Conglomerados sueltos y jaral. Pista Ocón-Arnedillo (P7). 106

4.8. Revegetación de la calzada. Pista Ocón-Arnedillo (P7). 123
4.9. Revegetación del talud inferior (T2). Se observa una cubierta arbórea anterior a la creación del talud inferior y el cubrimiento total de este talud por la vegetación herbácea. 123
4.10. Matorral (jara) cubriendo prácticamente la totalidad del talud inferior de la pista de Ocón-Arnedillo (P7). 123
4.11. Crecimiento de retoño de pinos en el pie del corte-talud (T1). Pista forestal de Hoyos de Iregua (P2). 123
4.12. Revegetación desde el sector inferior de T1 favorecido por la caída de suelo y semillas (P7). 123
4.13. Vieja pista abandonada en la Sierra de la Hez, completamente recolonizada por la vegetación en Cabimonteros. 123
5.1. Incisión transversal en la intersección de la pista sin drenaje con un barranco (Pista Cornago-Alcarama) 131
5.2. Incisiones longitudinales sobre firme de zahorra fina compactada en la pista forestal de Santa Marina (Camero Viejo) 131
5.3. Profundas huellas de rodadura en la pista de Valgañón-Ezcaray (Sierra de la Demanda). Estas incisiones reconducen el agua con mucha eficacia tras una fuerte precipitación. 132
5.4. Incisión transversal del interior al exterior de la calzada tramo Menárez (Sierra de la Demanda) 132
5.5. Incisiones transversales en materiales arcillosos de la pista de Hoyos de Iregua (Sierra de Cebollera) 133
5.6. Deslizamiento en el talud inferior ocasionado por la circulación del agua en un drenaje superficial (Pista Valgañón-Ezcaray) 143
5.7. Construcción de drenajes transversales con trampa de sedimentos y pequeña lengua de desagüe en la pista Valgañón-Ezcaray (Sierra de la Demanda) .. 144
5.8. Hundimiento del drenaje de obra por el lavado del pie del talud. Pista Cornago-Alcarama. 146
5.9. Obstrucción de la entrada de un drenaje transversal por acumulación de Sedimentos (Pista Ocón-Arnedillo) 146
5.10. Grieta alargada en el borde exterior de la calzada de la pista forestal de Santa Marina 147
5.11. Detalle de la acumulación de partículas y sedimentos en las rigola (RT1) de la pista de Santa Marina. 172
5.12. Rigolas e interrigolas en el corte-talud de Santa Marina 175

5.13. Movimiento en masa que afecta al corte-talud (T1) de una pista forestal. El material invade la calzada haciéndola intransitable. 178
5.14. Movimiento en masa de grandes proporciones en el talud inferior (T2) de una pista forestal. La Villa de Ocón. 178
5.15. Inestabilidad del corte-talud abierto en materiales morrénicos (Hoyos de Iregua). .. 193
5.16. Colada de barro y bloques en Torrecilla. Primavera de 2003. 193
5.17. Taludes de pistas forestales inclinados y desnudos en ladera de fuerte pendiente (Pazuengos). 193
5.18. Caídas de rocas en un corte-talud (T1) abierto en substrato rocoso (San Lorenzo) .. 193
5.19. Pista forestal con movimientos en masa en taludes con una importante cubierta vegetal de matorral y árboles (Villar de Poyales). 194
5.20. Zona crítica en Hoyos de Iregua. La pista secciona acumulaciones de material. morrénico y presenta un corte-talud (T1) afectado por un buen número de movimientos en masa. 194
5.21. Hundimientos de los gaviones como consecuencia de diferentes movimientos en masa en el corte-talud de Hoyos de Iregua. Estos fueron acompañados de coladas de barro y piedra en el talud inferior, tras persistentes e importantes precipitaciones del invierno y primavera en 1996. 194
5.22. Movimiento en masa en el corte-talud (T1) de la pista forestal de Ocón-Arnedillo. Afecta a un muro de bancal agrícola situado sobre el talud. 203
5.23. Deslizamiento de piedras y rocas en un corte-talud saturado. TS25-P2 207
5.24. Colada de barro y piedras que revienta el talud inferior justo debajo del proceso de la imagen anterior. Vista desde la pista. TI4-P2 207
5.25. Vista de la cicatriz de 15 metros de longitud desde la que el material se deslizó hasta el río 40 metros más abajo. 207
5.26. Ortoimagen de la cabecera del río Iregua (Sistema Ibérico riojano). Servicio de Cartografía y SIG del Gobierno de La Rioja. 211

ÍNDICE DE MAPAS

Mapas:

3.1. Localización de las principales unidades del Sistema Ibérico riojano 59
3.2. Pisos bioclimáticos de La Rioja 65
3.3. Densidades de carreteras y pistas en las áreas de montaña riojanas 81
3.4. Cartografía de las pistas forestales de la montaña riojana 83
4.1. Localización de las pistas forestales seleccionadas para el estudio 89
4.2. Recorrido de la pista Valgañón-Ezcaray (P1) sobre el mapa del Servicio Geográfico del Ejército E. 1:50.000. Hoja de Ezcaray 91
4.3. Recorrido de la pista de Hoyos de Iregua (P2) sobre el mapa del Servicio Geográfico del Ejército E. 1:50.000. Hoja de Villoslada 94
4.4. Recorrido de la pista Nieva-Gamellones (P3) sobre el mapa del Servicio Geográfico del Ejército E. 1:50.000. Hoja de Anguiano 96
4.5. Recorrido de la pista de Zenzano (P4) sobre el mapa del Servicio Geográfico del Ejército E. 1:50.000. Hojas de Logroño y Munilla 98
4.6. Recorrido de la pista de Santa Marina (P5) sobre el mapa del Servicio Geográfico del Ejército E. 1:50.000. Hoja de Munilla 102
4.7. Recorrido de la pista Cornago-Sierra de Alcarama (P6) sobre el mapa del Servicio Geográfico del Ejército E. 1:50.000. Hoja de Cervera de Río Alhama 104
4.8. Recorrido de la pista de La Villa de Ocón-Arnedillo (P7) sobre el mapa del Servicio Geográfico del Ejército E. 1:50.000. Hoja de Munilla 107
5.1. Mapa de la red de pistas forestales del área de estudio 212
5.2. Mapa de la cuenca con los tramos de pista y los movimientos en masa 213
5.3. Pista forestal estudiada con la banda de 50 m, tramos de análisis (TA) y de validación (TV) y sus Unidades de Ladera (UL) 214
5.4. Mapa de altitudes correspondiente a las UL por las que discurre la pista forestal de Hoyos de Iregua. 217
5.5. Mapa de exposiciones correspondiente a las UL por las que discurre la pista forestal de Hoyos de Iregua. 218
5.6. Mapa de pendientes correspondiente a las UL por las que discurre la pista forestal de Hoyos de Iregua 221

5.7. Mapa del potencial hídrico superficial correspondiente a las UL por la que discurre la pista forestal de Hoyos de Iregua 222
5.8. Distancia a la red fluvial principal de las UL 225
5.9. Mapa de vegetación y usos del suelo en el alto valle del Iregua 226
5.10. Mapa litológico y geomorfológico del alto valle del Iregua 227
5.11. Mapa litológico y geomorfológico correspondiente a la banda de 50 m por las que discurre la pista forestal de Hoyos de Iregua 228
5.12. Mapa de probabilidad de inestabilidad por movimientos en masa en la pista forestal de Hoyos de Iregua a partir de UL. 235
5.13. Mapa de probabilidad de inestabilidad por movimientos en masa en la pista de Hoyos de Iregua a partir del estudio de “pixels” de 5 m 242
5.14. Mapa de riesgo por movimientos en masa en la pista de Hoyos de Iregua a partir del volumen movilizado. 243
5.15. Mapa definitivo de riesgo por movimientos en masa en la pista de Hoyos de Iregua 244

ÍNDICE DE TABLAS

Tablas:

1.1. Diferentes criterios de clasificación de pistas forestales. 3
2.1. Puntos de muestreo 29
2.2. Kilómetros, número de tramos y “pixels” analizados en la pista de Hoyos de Iregua 55
3.1. Características termopluviométricas de la Sierra de la Demanda 68
3.2. Características termopluviométricas de Camero Nuevo 70
3.3. Características termopluviométricas del sector montañoso oriental 72
3.4. Clases de firme en las pistas forestales riojanas 76
3.5. Anchura de las pistas forestales riojanas 76
3.6. Distribución de pistas forestales y vías de acceso según la altitud 85
3.7. Distribución de pistas forestales y vías de acceso según la pendiente 86
3.8. Distribución de pistas forestales y vías de acceso según la exposición 86
3.9. Distribución de pistas forestales y vías de acceso según la vegetación 87
3.10. Distribución de pistas forestales y vías de acceso según la distancia a los ríos 87
4.1. Cuadro resumen de algunas de las características generales de las pistas estudiadas 90
4.2. Morfometría de las pistas estudiadas 109
4.3. Correlaciones entre las distintas características morfométricas de las pistas para el corte-talud (T1) 111
4.4. Correlaciones entre las distintas características morfométricas de las pistas para el talud inferior (T2) 111
4.5. Perfiles de los cortes-taludes (T1) de las pistas forestales 113
4.6. Cubrimiento vegetal en los taludes de las pistas forestales (%). 119
4.7. Cubrimiento vegetal (%) y tipos de vegetación según el sector del talud 121
4.8. Cubrimiento vegetal (%) y tipos de vegetación según la altitud en taludes de pistas forestales 122
4.9. Cubrimiento vegetal (%) y tipos de vegetación según la exposición de los taludes .. 124
4.10. Cubrimiento vegetal (%) y tipos de vegetación según la pendiente de los taludes .. 125
4.11. Cubrimiento vegetal (%) y tipos de vegetación según la vegetación de la ladera ... 125

5.1. Características de las incisiones en las calzadas de las pistas seleccionadas 133
5.2. Incisiones en la calzada de la pista y tipo de firme 135
5.3. Pendiente de la recta de regresión y correlaciones entre la pendiente longitudinal de la calzada de la pista (variable independiente) y la profundidad de las incisiones (variable dependiente) para determinados grupos de casos. 136
5.4. Características generales de las parcelas y suelos sobre los que se realizó la simulación de lluvia en las calzadas de las pistas. 137
5.5. Resultados hidrológicos de las simulaciones de lluvia en las calzadas de las pistas forestales. 139
5.6. Correlaciones y p-values entre la escorrentía y las características de las parcelas .. 139
5.7. Producción de sedimentos en las pruebas de simulación de lluvia 140
5.8. Correlaciones y p-values entre tasas de pérdida de suelos y características de las parcelas. 141
5.9. Drenajes en las tres pistas estudiadas 145
5.10. Características generales de los drenajes 145
5.11. Microambientes geomorfológicos en los taludes de las pistas forestales 150
5.12. Correlaciones entre los distintos microambientes geomorfológicos en el corte/talud (T1) 150
5.13. Correlaciones entre los distintos microambientes geomorfológicos en el talud inferior (T2) 151
5.14. Microambientes geomorfológicos en T1 y T2 con elevados niveles de significación según la prueba t-Test 152
5.15. Análisis Discriminante 152
5.16. Los microambientes geomorfológicos en las distintas pistas forestales 154
5.17. Factores ambientales relacionados con la distribución de deslizamientos (T1), microprocesos de erosión (T1) y arroyamiento difuso severo (T2). 156
5.18. Características generales de las parcelas y suelos sobre los que se realizó la simulación de lluvia. 161
5.19. Resultados hidrológicos de las simulaciones de lluvia en los cortes-taludes (T1) de las pistas forestales 163
5.20. Resultados hidrológicos de las simulaciones de lluvia en los taludes inferiores (T2) de las pistas forestales 163
5.21. Correlaciones y p-values entre la escorrentía y las características de las parcelas .. 164
5.22. Producción de sedimentos en las pruebas de simulación de lluvia en los cortes-taludes (T1) 164
5.23. Producción de sedimentos en las pruebas de simulación de lluvia en los taludes

inferiores (T2) 165
5.24. Correlaciones y p-values entre las tasas de pérdida de suelos y las características de las parcelas 167
5.25. Características de los sectores donde se instalaron las agujas de erosión. 168
5.26. Algunas características de la pista de Santa Marina 168
5.27. Valores medios anuales (mm) en las distintas estaciones con clavos de erosión ... 169
5.28. Media de valores climáticos de la estación meteorológica de Munilla (1992-95). 169
5.29. Comportamiento estacional de las tasas de erosión (-) y acumulación (+) en los taludes de la pista de Santa Marina (mm). 171
5.30. Características básicas de los deslizamientos 180
5.31. Prueba T de Student para las diferentes características básicas de los movimientos en masa en el corte-talud (T1) e inferior (T2) 180
5.32. Distribución general por pistas y taludes de los movimientos en masa 181
5.33. Características de los movimientos en masa en las tres pistas estudiadas 182
5.34. Volumen de material desprendido (m^3) en los casos estudiados 182
5.35. Volumen de material desprendido (m^3) por pistas 183
5.36. Porcentaje medio de calzada afectada por los movimientos en masa del corte-talud (invasión del material movilizado) y del talud inferior (hundimiento de calzada) 184
5.37. Coeficientes estandarizados (Beta) en la regresión múltiple 187
5.38. Material desprendido (m^3) según litologías 189
5.39. Material desprendido (m^3) según altitud 190
5.40. Material desprendido (m^3) según exposición 191
5.41. Material desprendido (m^3) según pendiente de la ladera 192
5.42. Material desprendido (m^3) según forma de la ladera 192
5.43. Material desprendido (m^3) según sector de la ladera 192
5.44. Material desprendido (m^3) según la longitud del talud 195
5.45. Material desprendido (m^3) según la altura del talud 195
5.46. Material desprendido (m^3) según la inclinación del talud 196
5.47. Material desprendido (m^3) según el tipo de cubierta vegetal del talud 196
5.48. Material desprendido (m^3) según el porcentaje de cubierta vegetal del talud 197
5.49. Grupos obtenidos del análisis de conglomerados (cluster) 198
5.50. Autovalores del análisis discriminante 199
5.51. Matriz de estructura del análisis discriminante (correlaciones entre las variables discriminantes y las funciones discriminantes canónicas tipificadas) 200
5.52. Resultados de clasificación 201

5.53. Valores medios (variables cuantitativas) y frecuencias de distribución más elevadas (variables cualitativas) en los grupos de desprendimientos seleccionados por el análisis cluster jerárquico. 202
5.54. Distribución de los grupos de movimientos en masa por pistas forestales 204
5.55. Tipos de movimientos en masa en las zonas críticas de los taludes de pistas forestales 206
5.56. Distribución de las UL (unidades de ladera) y "pixels" en la pista forestal estudiada según la altitud para el tramo analizado y el de validación. 215
5.57. Distribución de las UL (unidades de ladera) y "pixels" en la pista forestal estudiada según la orientación para el tramo analizado y el de validación. 216
5.58. Distribución de las UL (unidades de ladera) y "pixels" en la pista forestal estudiada según su pendiente para el tramo analizado y el de validación. 219
5.59. Número medio de días con precipitaciones superiores a 30 mm. Periodos 1970-75 y 1984-88 219
5.60. Número medio días de helada en el área de estudio 220
5.61. Precipitación total anual en las UL (unidades de ladera) y "pixels" en la pista forestal estudiada para el tramo analizado y el de validación. 220
5.62. Distribución de las UL (unidades de ladera) y "pixels" en la pista forestal estudiada según el potencial hídrico superficial para el tramo analizado y el de validación. 223
5.63. Cubierta vegetal en las UL (unidades de ladera) y "pixels" de la pista forestal estudiada para el tramo analizado y el de validación. 224
5.64. Distribución de las UL (unidades de ladera) y "pixels" en la pista forestal estudiada según litología y principales formas del relieve para el tramo analizado y el de validación. 230
5.65. Matriz de Estructura del Análisis Discriminante para el estudio de UL 232
5.66. Resultados de clasificación general del AD en el tramo de análisis (TA) para el estudio de unidades de ladera (UL) 232
5.67. Resultados de clasificación general de la RL en el tramo de análisis (TA) para el estudio de unidades de ladera (UL) 233
5.68. Resultados de clasificación general del AD en los tramos de validación (TV) para el estudio de UL 234
5.69. Variables incorporadas a la evaluación del riesgo en la pista Hoyos de Iregua en el análisis de "pixels" 236
5.70. Matriz de Estructura del Análisis Discriminante para el estudio de "pixels" 237
5.71. Resultados de clasificación general del AD en el tramo de análisis (TA)

para el estudio de “pixels” 238
5.72. Resultados de clasificación general de la AD en el tramo de análisis (TA) para el estudio de “pixels” considerando el volumen de material movilizado. 239
5.73. Resultados de inestabilidad obtenidos al aplicar el modelo predictivo al tramo de validación (TV) 241
5.74. Resultados obtenidos del volumen de material movilizado al aplicar el modelo predictivo al tramo de validación (TV) 241
6.1. Valores medios de algunas características de las laderas y los taludes en las pistas correspondientes al MODELO 1. 247
6.2. Distribución de los modelos geomorfológicos desarrollados en pistas forestales. 248
6.3. Valores medios de algunas características de las laderas y taludes en las pistas correspondientes al MODELO 2. 249
6.4. Valores medios de algunas características de las laderas y taludes en las pistas correspondientes al MODELO 3. 250

INTRODUCCIÓN

1. Definición del problema

Las áreas de montaña de las regiones templadas, gestionadas tradicionalmente con intensidad, han quedado integradas en tiempos recientes dentro de nuevos sistemas y modelos socioeconómicos más complejos y dinámicos que están dirigidos por y desde los centros urbanos (Lasanta & Ruiz Flaño, 1990). Con una importante pérdida de capacidad productiva y una drástica reducción de sus contingentes de población, la montaña se ha convertido en un espacio destinado a la explotación de recursos hidráulicos, forestales, paisajísticos o culturales. Estos nuevos usos del territorio, unido al incremento del número de vehículos, han obligado a la construcción de vías de acceso con técnicas, materiales y presupuestos diferentes. Así pues, la montaña, en este momento, se encuentra surcada por caminos, pistas forestales e incluso carreteras asfaltadas de gran calidad.

En nuestro país será a partir de la década de los 70, con el incremento de las superficies repobladas (Ortigosa, 1991), cuando se comiencen a establecer objetivos de ampliación y mejora de la red de vías y pistas forestales. En concreto, y según fuentes del ICONA, entre 1969 y 1979 los kilómetros de pistas se multiplicaron casi por cuatro, pasando de 10.958 a 37.186 kilómetros. Esto representó alcanzar una densidad de 4.5 metros de pista por hectárea en los montes gestionados por el Estado, ratio todavía insuficiente, según los técnicos de montes, al necesitarse unos 10 metros/hectárea. Estudios recientes han rebajado ligeramente esta densidad a valores de 8 a 10 metros/hectárea (Elorrieta Jove et al., 2001).

A partir de los 90 la instalación de infraestructuras de comunicación, la lucha contra los incendios, el acceso a embalses, la construcción de parques eólicos o tendidos eléctricos y, en menor medida, la reforestación y la mejora del acceso a pastizales han sido las principales causas de la construcción de nuevas pistas forestales.

El conocimiento de las redes de pistas forestales o de montaña en España es muy limitado. Con la desaparición del ICONA, ya no se dispone de información a nivel estatal que aborde el tema de forma global. Los inventarios pueden diferir entre Comunidades Autónomas, ya que, al no existir una terminología comúnmente aceptada, la catalogación y homologación se hace complicada. Por otro lado, muchos de los trazados de las pistas

forestales se han construido rápidamente dentro de proyectos más extensos (explotación forestal, prospecciones petrolíferas, etc.), sin estudios previos y con obras de calidad muy deficiente por los bajos presupuestos manejados. A menudo es difícil e incluso imposible determinar la fecha de construcción o de reacondicinamiento. El abandono de las pistas, la recolonización vegetal y los procesos de erosión suelen dificultar su localización y catalogación mediante ortoimágenes. Los avances tecnológicos en los campos de la informática o la información espacial deben impulsar y facilitar el conocimiento objetivo de la distribución de nuestras vías de comunicación y sus problemas.

Existen diversas clasificaciones para las pistas forestales, entre ellas destaca la propuesta por Elorrieta Jove, (1989); si bien, son muy diversos los criterios aplicables (Tabla 1.1). Las que han sido objeto de nuestro estudio corresponden a accesos a áreas de montaña que disponen de una calzada de anchura variable[1], un corte-talud, que se configura al insertar la pista en la ladera, y un talud inferior, aguas abajo de la calzada, sobre el que se acumula el derrubio suelto obtenido en la excavación (Foto 1.1). Esta sencilla descripción es aplicable a una amplia gama de vías de acceso, lo que nos obliga a ser algo más precisos.

En este trabajo se han considerado dos tipos de pistas forestales o de montaña: las "primarias o principales sin asfaltar" y las "secundarias". Las primeras disponen de un firme estabilizado y compactado de macadam, grava de distinto tamaño o zahorra fina. Sus anchuras son habitualmente superiores a los 4.5 metros, disponiendo de tramos más anchos para el cruce de vehículos; sus desniveles, que normalmente oscilan entre los 3 y 6º, no suelen alcanzar los 10º; y conectan con vías secundarias. En ellas se han realizado obras de drenaje como cunetas o pasos subterráneos transversales para evacuar el agua ladera abajo. La conectividad de estas pistas es buena y soportan una intensidad de tráfico moderado. Por ellas transitan turismos con relativa facilidad dada la composición del firme que es mantenido de forma periódica (Foto 1.2).

Las pistas "secundarias" son vías de montaña de uso diverso que parten de otras de mayor capacidad. Sus anchuras son más ajustadas (entre 3.5 y 5 metros) y carecen de tramos ensanchados. Los firmes son a menudo de terreno natural poco estabilizado o sin

[1] En nuestro trabajo se utilizará el término calzada para designar a la superficie horizontal que se extiende desde el corte-talud superior hasta el talud inferior. Dispone de distintos tipos de firme y permite la circulación de los vehículos, personas y animales.

compactar. Su estado suele ser deficiente debido al lavado de finos y a las huellas de rodadura de los vehículos que reconducen y concentran el arroyamiento superficial. Las pendientes de estas pistas pueden superar los 10º y cuentan con precarias obras de drenaje. Pueden ser transitadas por turismos pero con dificultad debido a la pedregosidad y a las irregularidades de la calzada. No suelen comunicar núcleos de población (Foto 1.3).

Tabla 1.1. Diferentes criterios de clasificación de pistas forestales

Criterio	**Tipo**
Explotación maderera	pistas principales pistas secundarias pistas de 3º orden o vías de saca
Transitabilidad	cortafuegos de baja transitabilidad cortafuegos transitables por vehículos 4x4 cortafuegos transitables por camiones contra incendios pistas para vehículos 4x4 pistas para camiones
Accesibilidad	paso libre paso con restricciones
Propiedad	privadas públicas (autonómicas, municipales, etc.)
Uso	forestales mineras recreativas
Tipo de firme en la calzada	firmes de terreno natural sin estabilizar firmes de terreno natural estabilizado firmes de zahorras finas firmes de gravas firmes de macadam firmes bituminosos firmes asfálticos
Anchura de la calzada	< 3.5 m de 3.5 a 4.5 m de 4.5 a 6.5 m de 6.5 a 8.5 m > 8.5 m
Posición en el contexto de las vertientes	pistas de laderas bajas pistas de laderas medias pistas de cumbres o divisorias
Conectividad	pistas de baja conectividad sin salida (*orphan roads*) pistas de alta conectividad (*arterial* o *collector roads*) pistas de conectividad intermedia



Foto 1.1. Pista con sus diferentes secciones: corte-talud, calzada y talud inferior. Ruptura de la continuidad vegetal, edáfica e hidrogeomorfológica de la ladera.



Foto 1.2. Pista primaria o arterial Valgañón-Ezcaray (P1). Saca de madera camiones de gran tonelaje.



Foto 1.3. Pista secundaria en la Sierra de la Demanda (barranco Menárez en Ezcaray).

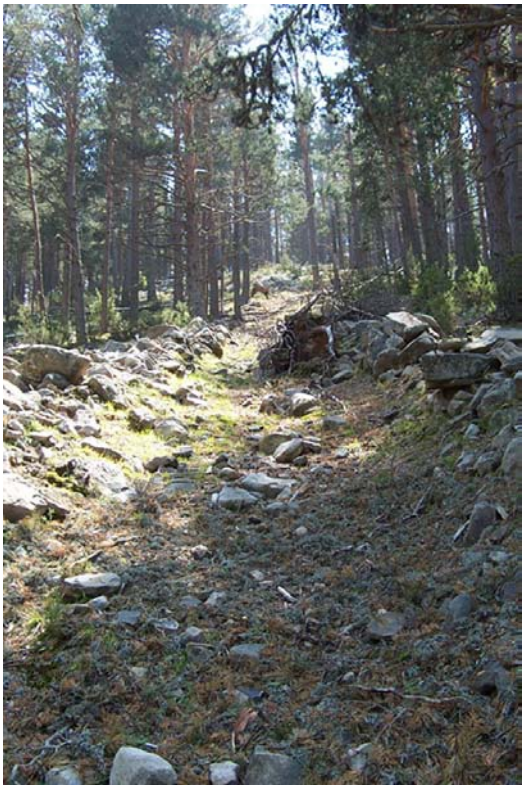


Foto.1.4. Trocha abierta por buldozer para la saca de madera en Hoyos de Iregua. Sierra de Cebollera.



Foto 1.5. Carretera local y trocha abierta para la instalación del tendido eléctrico del Parque eólico Sierra la Hez.



Foto 1.6. Pista forestal en la Cruz de la Demanda (Sierra de la Demanda). Tramo en zig-zag asfaltado para el ascenso hasta la línea de cumbres (2.000 m).

A pesar de ser estas pistas las seleccionadas para nuestro estudio, en la montaña riojana aún es posible recorrer otros tipos: las que disponen de firme asfáltico (carreteras locales, antiguas pistas o caminos forestales que han sido asfaltados y readaptados con posterioridad para un uso público generalmente recreativo) y las trochas (vías de fuerte desnivel, estrechas y abiertas al paso exclusivo de vehículos 4x4, buldozers o "skiders". Carentes de firme, su piso es muy irregular y se encuentran muy afectadas por la erosión) (Foto 1.4).

1.1. Las pistas forestales y su incidencia socioeconómica

Las pistas forestales son importantes para el desarrollo económico y la calidad de vida del hombre de la montaña. La construcción de estas vías persigue la obtención de un conjunto de ventajas y beneficios para la comarca. La rápida accesibilidad a los espacios forestales, a los pastos de montaña o a los cotos de caza y pesca facilita la ejecución de las diferentes labores que se realizan a lo largo del año. Los trabajos forestales (reforestación, aclareos, tratamientos, extracción, etc) y de protección contra incendios mejoran su eficacia y rentabilidad. El manejo y cuidado del ganado se realiza con mayor comodidad. Por otro lado, la fase de construcción así como las labores de mantenimiento pueden exigir mano de obra de la población local.

Pero las pistas forestales no sólo están relacionadas con las actividades silvopastoriles. Algunas de ellas se han trazado por la necesidad de explotar yacimientos mineros. En La Rioja la explotación minera justificó la apertura de pistas en Peñalmonte, Leza o Viguera durante el siglo pasado. En los últimos años la construcción de parques eólicos, como los de Yerga (1998) y Sierra la Hez (2000), ha supuesto la ampliación, restauración y rediseño de la red de pistas en estas zonas (Foto 1.5). Lo mismo sucede con la construcción de embalses. Las pistas no sólo permiten el acceso al área del alzamiento de la presa sino a puntos concretos de la montaña desde donde se extrae el material para la construcción (grandes rocas, tierra, etc.). Por último, las prospecciones petrolíferas también han exigido el trazado de pistas para el acceso a los puntos de sondeo o potenciales áreas de extracción.

Las pistas forestales facilitan el paso a espacios de alto valor cultural, deportivo y ambiental, muy demandados en los últimos años por una población urbana que ha apostado por el llamado turismo ecológico, turismo verde o turismo de aventura. La proliferación de espacios protegidos, los importantes cotos de caza y pesca de las áreas de montaña o la existencia de áreas recreativas sirven de reclamo a la llegada de diferentes tipos de visitantes. La afluencia se convierte en masiva cuando la oferta de la zona de montaña incluye la posibilidad de la práctica del esquí.

Las actividades descritas aportan importantes beneficios económicos a las áreas de montaña, pero también traen consigo algunos inconvenientes. Por lo que respecta a las pistas forestales, la circulación densa de vehículos deteriora con cierta rapidez la propia pista, especialmente en la época en la que los suelos se encuentran saturados de agua. El tránsito de estos mismos vehículos por zonas protegidas o de interés medioambiental puede ocasionar impactos irreparables en su flora y fauna. Estas circunstancias han aconsejado en algunos casos el uso restrictivo de las pistas o la aplicación de sistemas que regulen su uso. En La Rioja, la red de pistas ha ido cerrándose al libre tránsito en los últimos años; por ejemplo, a partir de la declaración del Parque Natural de la Sierra de Cebollera (1995), el tráfico de vehículos en las pistas se incrementó con tal intensidad que las autoridades del Parque se vieron obligados a establecer controles de circulación de vehículos.

En definitiva, la montaña se ve afectada por el trazado de pistas forestales. Con la mejora de la accesibilidad se abren nuevas posibilidades de desarrollo aunque en algunos casos con costes ambientales. La construcción de pistas está permanentemente sometida a una constante controversia. Sería adecuado evaluar sus efectos ambientales, socioeconómicos y sobre el paisaje, antes de tomar la decisión de abrir una de estas vías.

1.2. Impactos de las pistas forestales en el medio natural

El trazado de pistas forestales en áreas de montaña implica un conjunto de impactos en el medio natural que son visibles en el momento de su construcción y, posteriormente, a lo largo de su vida útil. Folch i Guillén (1977) planteó la posibilidad de obtener una ecuación que indicase el "índice de alteración ecológica" con el fin de desarrollar técnicas

de construcción de pistas menos agresivas con el medio físico.

El catálogo de efectos que supone la construcción y uso de una pista forestal es amplio. En primer lugar, se ve afectada la calidad del aire debido a los movimientos de tierra y al transporte de materiales. El aumento de la emisión de partículas en suspensión afecta con intensidad a la flora. La contaminación atmosférica continúa posteriormente como consecuencia de la circulación de vehículos. Éstos no sólo emiten gases y partículas ligadas a la combustión de los carburantes sino que también levantan el suficiente polvo como para, si la circulación es muy intensa, reducir la visibilidad y calidad de los espacios naturales (USDA, 2001).

La contaminación acústica está también presente en la fase de construcción y durante la explotación de la pista. Las acciones más negativas en la fase de obras son las voladuras y el tráfico de la maquinaria pesada. Una vez construidas, el ruido de un tráfico intenso en las épocas de cría o reproducción de la fauna podría llegar a tener graves consecuencias.

La construcción de pistas forestales tiene efectos en la pérdida de volúmenes importantes de suelo fértil. La excavación de la ladera supone la eliminación de una parte de la capa edáfica tanto en la zona ocupada por la calzada como en el corte-talud. Otra proporción de suelo, ladera abajo de la pista, desaparece enterrado con el vertido y acumulación de los materiales excavados. La pérdida de productividad por el efecto directo de la movilización de tierras durante la construcción y mantenimiento de carreteras ha sido estimada entre menos del 1 y el 30% (Megahan 1988a). Por otra parte, la escasez de materia orgánica en el corte-talud y en el material no compactado del talud inferior dificultan la recolonización de la vegetación y la reconstitución de los suelos.

Los impactos sobre la vegetación tienen lugar en la fase de obra. La construcción de la pista provoca la eliminación de la cubierta vegetal en la superficie que ocupa, superficie que no es en absoluto desdeñable sobre todo cuando aumentan las pendientes de las laderas. De este modo, en la intersección de la ladera con el trazado de la pista se produce una ruptura de la continuidad vegetal. Naiman & Décamps (1997) comparan esta zona de contacto con una membrana semipermeable reguladora de los flujos de energía y material entre sistemas adyacentes.

La fauna también es afectada por estas vías de comunicación. Las pistas facilitan el acceso y frecuentación a hábitats naturales, lo que repercute en la vida de los animales (Gordi Serrat, 1992) y puede afectar a la integridad ecológica a escala regional y de cuenca (Quigley et al. 1997). El tránsito de vehículos, con ruidos y emisiones de gases, y, sobre todo, la llegada de un buen número de visitantes a lugares antes aislados suponen una seria amenaza para la supervivencia de muchas especies o limita su presencia. Por otro lado, la construcción de carreteras y pistas, cuando éstas son de grandes dimensiones, puede fragmentar comunidades animales. La densidad de carreteras y pistas es un útil indicador para valorar la calidad y cantidad de la fauna salvaje (Rudis, 1995; Forman et al., 1997). Estudios en EEUU muestran como las mayores poblaciones de peces se encuentran con más frecuencia en áreas con menor densidad de pistas (Lee et al. 1997). Las intersecciones de las pistas con los arroyos y ríos de montaña tienen consecuencias muy negativas para las especies piscícolas. En Wisconsin se ha comprobado que los lobos ocupan espacios donde prácticamente las pistas forestales están ausentes (Mladenoff et al. 1995). Anderson & McDonald (1998) advierten del riesgo de deterioro del arrecife de coral a partir de los sedimentos aportados por las pistas que recorren las Islas Virgen.

La degradación estética de los paisajes también puede estar ligada a la aparición de pistas forestales (MOPT, 1991; Cañas & Ruiz, 2001). Las pistas suponen un elevado impacto paisajístico al introducir líneas rectas que suelen ser discordantes con las formas onduladas del terreno. Además, se produce un fuerte contraste cromático con el entorno por la presencia de zonas sin vegetación. La ruptura de la unidad paisajística en las montañas se incrementa a medida que aumentan las dimensiones de la pista y las pendientes (Foto 1.6). Como es lógico, en las laderas de fuerte pendiente, donde los taludes son de mayores dimensiones, este impacto es mucho más notorio.

Por último, no hay que olvidar los efectos hidrológicos y geomorfológicos que conlleva la construcción y mantenimiento de una pista forestal. Como nuestro trabajo girará en torno a estos aspectos, se abrirá un apartado específico seguidamente.

Por lo dicho hasta ahora, puede señalarse, tal y como han indicado Haber (1990) y Lugo & Gucinski (2000), que las pistas forestales son “tecno-ecosistemas”. Las carreteras y pistas ocupan espacios ecológicos (Hall et al., 1992), se articulan a partir de elementos estructurados, cuentan con una flora específica, intercambian materia y

energía con otros ecosistemas y experimentan cambios temporales. Naiman y Décamps (1997), desde una perspectiva ecológica, dividen la interfase en dos zonas (calzada y ecotono) para diferenciar mejor entre la vegetación a lo largo de la pista y la vegetación de la interfase, cuya separación podría ser brusca o gradual, dando lugar a un ecotono que, difiere tanto de la pista como del ecosistema natural adyacente. La anchura de una pista de montaña difiere de la de su influencia ecológica, o geomorfológica. A los cuatro o cinco metros de calzada se pueden sumar los que alcanzan: la movilización de tierras durante las obras, el ruido de los vehículos que la transitan o, el polvo y la arena que son transportados por el viento o las aguas.

1.3. Efectos hidrogeomorfológicos de las pistas forestales

Desde una perspectiva hidrogeomorfológica, las pistas forestales -construidas y mantenidas con escasos presupuestos que reducen la aplicación de sistemas de control- conllevan un incremento importante de la erosión (Gucinski et al., 2001), proceso considerado como uno de los impactos más desfavorables en estas vías de comunicación (Tolosana, 1993; Burroughs et al., 1991). La erosión se manifiesta a través de una amplia variedad de mecanismos.

Los movimientos en masa de diferente tipo y tamaño (desde deslizamientos a pequeñas caídas de rocas o tepes) son habituales en los taludes de las pistas. Algunos incluso pueden llegar a convertirse en movimientos en masa de carácter catastrófico y espectacular. Valdiya (1988) calculó que los 44.000 kilómetros de pistas trazados en la Cordillera del Himalaya generaban al año 550 m^3/km de derrubios. Haigh (1984b) detectó una producción de sedimentos como consecuencia de movimientos en masa de 1.105 m^3/km a lo largo de 6 kilómetros de pista. Jones et al. (1983) indicaron que en la cordillera del Karakorum el 8% de las pistas planteaban problemas de seguridad por la actividad de los movimientos en masa. Bansall & Mathur (1976) les aplicaron el calificativo de pesadillas para las carreteras de montaña. A pesar de la escasa extensión de las carreteras o pistas de montaña, el aporte de sedimentos provenientes de los movimientos en masa es tan importante que puede equipararse a las consecuencias erosivas ligadas a las reforestaciones. Larsen & Parks (1997) mostraron la asociación

existente entre diferentes movimientos en masa en las laderas y el trazado de pistas forestales, señalando que estos procesos se incrementaban de 5 a 8 veces en áreas con pistas. Por otro lado, constataron que la zona de inestabilidad de la pista se extendía a una distancia de 85 metros por encima y por debajo de la misma.

Aunque en el Himalaya los casos estudiados reflejan una actividad geomorfológica espectacular, también en otras zonas se han hecho cálculos sobre el papel de los movimientos en masa en pistas forestales con resultados interesantes. Wemple et al. (2001) estudiaron en Cascade Range los procesos surgidos a partir de fuertes tormentas. En esta misma línea destacan los trabajos de Swanson & Dyrness (1975), Haigh et al. (1988). En la región del Pacífico Noroeste los dos principales procesos que contribuyen a la producción de sedimentos son los movimientos en masa y la erosión superficial que se origina en las carreteras de montaña (Frediksen, 1970; Reid & Dunne, 1984).

Los movimientos en masa en pistas forestales constituyen un auténtico problema en regiones y comarcas con escasos recursos económicos y humanos al obligar a continuas labores de reacondicionamiento muy costosas. En nuestras pistas forestales estos procesos no son tan espectaculares como los de las montañas alpinas, pero sí pueden cortar los accesos en temporadas concretas, destruir las calzadas de las pistas y obligar a labores de reconstrucción.

Las escorrentías superficiales a través del arroyamiento laminar o concentrado arrancan y transportan el material hacia barrancos y cauces (Froehlich, 1995; Ziegler et al. 2001). Megahan et al. (1986) estimaron un incremento de cinco veces la producción de sedimentos como consecuencia de la construcción de una pista forestal en Idaho (USA). Fredriksen (1970) apuntó un aumento de treinta y nueve veces la carga de sedimentos después de la construcción de carreteras en una cuenca cubierta de bosque en Oregón (USA). En algunos casos el agua puede llegar a aprovechar la rodadura de los vehículos para trazar rigolas que hacen impracticable con el tiempo la circulación rodada (Anderson & MacDonald 1998). Reid (1981) estimó que, al menos el 40 % de la sedimentación producida se atribuía a pistas de repoblación en la cuenca del río Clearwater (Washington, EE.UU.). Para muchos investigadores las pistas constituyen la mayor fuente de sedimentos en las áreas forestales (Hoover, 1952; Patric, 1976; Anderson & Lloid, 1991 y Anderson et al., 1996).

En conjunto las redes de carreteras y pistas tienden a incrementar la densidad de drenaje, ya que no sólo interrumpen los flujos, sino que los concentran, reconducen y dispersan hacia los pies de las laderas en busca de la red hídrica. Estos cambios alteran los regímenes hídricos y los picos de crecida (King & Tennyson 1984, Wemple et al. 1996). Durante las tormentas algunos segmentos de pista contribuyen mucho más que otros en virtud determinados factores topográficos y ambientales (Larrea-Sáenz & Arnáez 1994, Bowling & Lettenmeier 1997, Wemple et al. 1996).

El mayor o menor impacto hidrogeomorfológico de una pista forestal y su duración en el tiempo vienen determinados por factores técnicos (métodos de construcción, inversiones en reparaciones y mantenimiento, etc), por la intensidad de uso, por el tiempo transcurrido desde su construcción, y por las condiciones ambientales y topográficas del sector donde se instala. Con respecto a este último aspecto, no hay que olvidar que una pista forestal enclavada en una área de montaña debe adaptarse a un medio frágil e inestable buscando a lo largo del tiempo una nueva situación de relativo equilibrio. Los factores que se muestran más determinantes en la evolución geomorfológica de pistas forestales son la tectónica, la litología, la pendiente de las laderas, las condiciones climáticas y la vegetación.

El primer factor juega un papel relevante en aquellas pistas forestales que se localizan en regiones montañosas con una fuerte actividad sísmica y volcánica favorecedora de procesos erosivos normalmente catastróficos. No obstante, pequeñas fallas, diaclasas o esquistosidades, el buzamiento de los estratos y su relación con la pendiente pueden suponer graves problemas en la conservación de pistas forestales al activar, sobre todo, diversos tipos de movimientos en masa como han puesto de manifiesto Khaire (1975), Brunsden et al. (1981) y Van Westen & Terlien (1996).

El tipo y características de las rocas así como los mecanismos de meteorización y formación de suelos también influyen en los procesos de erosión detectados en pistas forestales. Rasgos como la permeabilidad, la fracturación, el espesor de los estratos, etc. pueden alterar la estabilidad de los taludes. En la práctica es imposible diseñar y construir pistas en las litologías más adecuadas, y muy difícil que su recorrido se trace a través de materiales de formación y composición homogéneos. Por ello afloramientos de rocas blandas sometidos a procesos de meteorización, cambios litológicos bruscos a lo largo de la pista, etc. se convierten en puntos de alto riesgo en su evolución geomorfológica.

Las laderas con un fuerte gradiente, propias de áreas de montaña, incrementan la posibilidad de actuación de procesos erosivos (Luce & Black, 2001). A través de estas vertientes se lleva a cabo la transferencia de flujos -agua y sedimentos- desde los sectores más elevados a los fondos de valle. La instalación de una pista forestal supone la interrupción de estos flujos. La escorrentía superficial y subsuperficial se encuentran con unas áreas (taludes y calzada) sin protección vegetal que se convierten en áreas-fuente de sedimentos (Tague & Band, 2001). El conocimiento del funcionamiento hidrogeomorfológico de la ladera se hace, pues, imprescindible para conocer el impacto ambiental que trae consigo la construcción de una pista forestal. Nos atreveríamos a señalar que en regiones tectónicamente estables éste es clave en la evolución geomorfológica de las pistas (Arnáez Vadillo & Larrea, 1994 a y b).

El clima en montaña sufre modificaciones en cortos espacios como consecuencia de los efectos que introducen la altitud y, a menor escala, la exposición y el ángulo de la pendiente (Del Barrio, 1990). La distribución del clima en la montaña establece un conjunto de sistemas morfoclimáticos que se distribuyen altitudinalmente formando diferentes pisos (Arnáez Vadillo, 1990). Por ellos circulan las pistas que se ven afectadas por procesos de erosión específicos.

En los sectores más elevados, por encima del nivel superior del bosque, la acción del hielo-deshielo y la fusión de la nieve son los principales mecanismos responsables de la erosión. El primero se encarga de la rotura de los afloramientos y crestones rocosos; el segundo permite el empapamiento del suelo y el desencadenamiento de movimientos en masa. Como veremos más adelante, ni unos ni otros son ajenos a las pistas forestales, que o bien se ven invadidas por estos procesos de erosión o bien sirven de punto de partida para los mismos.

Por debajo del nivel superior del bosque el agente más activo desde un punto de vista geomorfológico es el agua procedente de la precipitación. Las escorrentías provocan importantes pérdidas de suelo en los taludes de las pistas forestales, al disponer éstos de una fuerte inclinación y una escasa protección vegetal (Diseker & Richardson, 1962). Son, sobre todo, las precipitaciones de fuerte intensidad horaria las que suelen favorecer la iniciación de procesos de cierta magnitud. Es en estos momentos cuando se generaliza la formación de canales trenzados y rigolas, tanto en la calzada como en el talud inferior, que pueden tener continuidad en la ladera por debajo de la pista. También pueden

desencadenarse movimientos en masa de cierta espectacularidad. En concreto, y por señalar un ejemplo, con una precipitación intensa, en laderas del alto valle del Najerilla (Sistema Ibérico, La Rioja) se activaron un conjunto de coladas de piedra y barro (debris flow) que llegaron a bloquear la carretera que discurría por el valle (García-Ruiz et al., 1988).

Por último, la cubierta vegetal, como último factor citado, interviene en el ciclo hidrológico de las laderas protegiendo el suelo del impacto directo de las gotas de lluvia (splash), favoreciendo las escorrentías subsuperficiales y ralentizando las superficiales. Por otra parte, las raíces sujetan el suelo dificultando la actividad de algunos movimientos en masa. Así pues, la inexistencia de vegetación está relacionada con altas tasas de erosión en taludes de pistas forestales.

Como se puede comprobar, una pista forestal está sometida a variables ambientales que propician su inestabilidad. A esta inestabilidad también colabora, como ya se ha señalado, el tipo e intensidad de uso. Muchas pistas forestales soportan el paso permanente de vehículos. Reid & Dunne (1984) comprobaron que una carretera utilizada con intensidad por el paso de camiones cargados con troncos aportaba 130 veces más cantidad de sedimentos que otra totalmente abandonada. En los países desarrollados el uso de las áreas de montaña como zonas de esparcimiento y ocio ha incrementado la densidad de circulación por pistas inicialmente diseñadas para otros fines.

Conocedores de estos hechos los ingenieros han ideado un conjunto de técnicas de control de la erosión y mantenimiento de pistas, cuya aplicación está vinculada a los presupuestos manejados (I.C.O.N.A., 1983 y 1987; FAO, 1989; MOPU, 1989; USDA FS, 1999). Actuaciones sobre el drenaje de la pista (Haupt, 1959), el tratamiento del firme o revestimiento de la calzada (Swift, 1984; Kochenderfer & Helvey, 1987), las técnicas de filtrado de sedimentos (McFero, 1998) o la revegetación de cortes y taludes (Swift, 1988; Burroughs & King, 1989) son técnicas habituales. También las buenas prácticas en los trabajos forestales pueden disminuir las tasas de erosión como han señalado Samset (1990), Rotaru (1991), Rice (1992), Megahan et al. (1992) y Tolosana (1993). Fookes et al. (1985) explican y clasifican un buen número de sistemas de protección de pistas y carreteras de montaña, destinados, sobre todo, a áreas muy inestables, con laderas de fuerte pendiente y una intensa actividad geomorfológica. Un gran número de investigaciones han demostrado que la aplicación de sistemas de control en el diseño,

construcción y mantenimiento de carreteras puede reducir la erosión superficial a nivel de segmentos o tramos de pista.

Sin ánimo de ser exhaustivos, pues no es el objetivo de nuestro trabajo, indicaremos que las actuaciones más frecuentes en pistas forestales están destinadas a controlar la erosión en los taludes y a reconducir, en la medida de lo posible, la circulación hídrica.

Para el primer fin se llevan a cabo repoblaciones con especies vegetales (césped, arbustos o árboles), que frenan las escorrentías y sujetan los suelos, o se instalan mallas metálicas, gaviones, muros de hormigón, muros de piedra o grandes bloques, bulones, revestimientos de cemento, etc. Muchos estudios muestran como el recubrimiento con materiales y medidas de revegetación pueden reducir la producción de sedimentos finos (Burroughs et al. 1976 y 1984, Swift 1984 y 1985; Kochenderfer & Helvey 1987).

Para los drenajes se diseñan cunetas, que discurren al pie del talud superior o transversalmente a la calzada, y colectores subterráneos que desaguan las escorrentías desde el interior al exterior de la pista. Su misión es recoger y controlar tanto el agua que circula por la pista como la proveniente de la ladera.

Las pistas, al igual que las carreteras difieren en gran medida unas de otras. Las redes de pistas son productos de su tiempo y los estándares de su construcción y diseño (anchura, métodos, posición...) han cambiado. Consecuentemente, cada red o conjunto de segmentos o tramos abiertos contiene viejos y nuevos estándares, tipos de diseño con propuestas diferentes para cruzar un terreno con distintas sensibilidades. Este mosaico de segmentos o tramos de pista tiene implicaciones sobre como las pistas serán gestionadas en el futuro (Gullison y Hardner, 1993).

El patrón de la localización espacial de las pistas de montaña difiere de unas zonas a otras lo que origina distintos efectos medioambientales. Gucinski et al. (2001) señalan distintas configuraciones en los EEUU. Estas configuraciones, combinadas con la topografía, hidro-geología, el clima y la vegetación originan distintos efectos. En una misma región, los efectos varían según la posición que ocupan en el paisaje. Las líneas de cumbres, las laderas medias o los fondos de valles producen distintos efectos, en base a la topografía que atraviesan, su grado y tipo de interacción (interferencia) con la red hídrica, la respuesta hidrológica a las tormentas o los efectos del fuego, la fauna y la vegetación.

2. Estado de la cuestión

Los estudios relativos a los efectos hidrogeomorfológicos en pistas forestales son recientes pero numerosos. Destacan los promovidos por la Soil and Water Conservation Research Division (USDA), con los objetivos de evaluar los efectos de la escorrentía superficial y la producción de sedimentos, conocer los factores que determinan estas tasas (Diseker & McGinnis, 1967) y analizar los tipos de cobertera vegetal más efectivos para conseguir una rápida estabilización de los taludes de pistas forestales (Diseker & Richardson, 1962). En esta misma línea de cuantificación de la producción de sedimentos habría que mencionar los trabajos realizados por Reid & Dunne (1984), Diseker & McGinnis (1967), Lin (1987) y Froehlich (1991).

El aumento de la producción de sedimentos en pistas está bien documentado en algunas zonas de los EEUU. Los volúmenes de sedimentos por escorrentía superficial aportados desde las calzadas de pistas son más altos en los primeros años tras su construcción y están correlacionados con el nivel de tráfico (Megahan & Kidd, 1972; Zhang & Cundy, 1987). Por otro lado, los problemas de erosión son más intensos en terrenos de gran erodibilidad, sobre todo en granito o rocas muy fracturadas (Megahan 1974, Megahan & Ketchenson 1996). Kahklen (2001) evalúa la producción de sedimentos en suspensión (de repercusiones negativas para los salmónidos de Alaska) en sectores de pista que interceptan arroyos de abundante fauna. Aplica un conjunto de técnicas con las que se obtienen interesantes resultados sobre la producción de sedimentos desde las pistas.

Muy interesantes son las aportaciones de Megahan (1972) y Wemple (1994) sobre la intercepción del flujo subsuperficial y los de Luce & Cundy (1994) y Ziegler & Giambelluca (1997) sobre arroyamiento superficial.

Tsurumi (1973), Zhang & Cundy (1987), Fukushima (1987) y Megahan *et al*. (2001) estudian modelos matemáticos para predecir la producción de sedimentos. La simulación de lluvia también ha sido utilizada para la cuantificación de la producción de sedimentos por impacto de las gotas de lluvia (splash) y escorrentías superficiales. Varios estudios han aparecido en los últimos años utilizando parcelas experimentales en el campo

(Esteves et al., 2000; Foster et al., 2000; y Lascelles et al., 2000) y en el laboratorio (Brunton & Bryan, 2000). Sistemas de información geográfica y modelos predictivos han sido utilizados por Anderson & MacDonald (1998) para establecer diferencia de comportamiento entre dos cuencas con distinta densidad de pistas y uso. Numerosos estudios valoran la erosión por arroyamiento superficial en pistas forestales como la mayor fuente de sedimentos en las cuencas (Hansen, 1971; Patric, 1976; Van Lear et al. 1995).

Otros procesos geomorfológicos en pistas forestales que han llamado la atención de los investigadores han sido los movimientos en masa. Éstos, muy representativos en regiones de montaña inestables, han sido estudiados por Haigh et al. (1988 y 1989) en pistas de la cordillera del Himalaya. Estos autores hacen referencia a los tipos más habituales de movimientos en masa y a las variables que los condicionan. También intentan establecer un sencillo método de análisis para la predicción de deslizamientos sin la utilización de instrumental sofisticado y costoso. El interés de los movimientos en masa en pistas forestales y carreteras es creciente, pues constituyen un auténtico problema al obligar a continuas labores de reacondicionamiento muy costosas. La detección de áreas proclives a este tipo de procesos y el estudio de sus características han sido efectuados, entre otros, por Bansal & Mathur (1976) y Haigh (1984 a y b). Desde un punto de vista general por: Carrara et al. (1995), Crozier (1999), Chacón Montero (2003)...

El incremento de las tasas de erosión en carreteras de montaña afectadas por los movimientos en masa (debris slides) es de 30 a 300 veces superior al registrado en el bosque, aunque difiere de unas regiones a otras (Swanson & Dyrness, 1975; Megahan et al., 1978). Fransen et al. (2001), en Nueva Zelanda, calculan unas tasas de erosión por deslizamientos tres veces más altas que las provenientes de la erosión por arroyamiento superficial. Estudios en el Este de los EEUU muestran como estos deslizamientos son activados por las grandes tormentas favorecidas por las características geológicas del territorio. Los puntos más sensibles para la aparición de movimientos en masa como cruces de ríos y arroyos, desagües de la calzada, interferencias de flujos subsuperficiales, etc. han sido descritos por Burroughs et al. (1976), Clayton (1983) y Larsen & Parks, (1997).

Todo ello ha motivado un incremento del estudio de los movimientos en masa y de sus posibilidades de predicción, especialmente en áreas de montaña con importante riesgo

(sísmico, hidrometeorológico) y vulnerabilidad; áreas habitadas o de infraestructuras (Flageollet, 1999; Montgomery et al. 1999). Los estudios sobre la evaluación del riesgo o peligrosidad, de éstos y otros procesos de laderas, como los flujos y desprendimientos, han experimentado un importante avance en los últimos veinte años (Carrara, 1991; Casale y Margotini Eds., 1999; Hoek et al., 2000): se han integrado modelos hidrológicos asociados a la ruptura (Anderson et al. 1996; Brooks y Collison, 1996; Collison y Anderson 1996; Montgomery y Dietricht, 1994, Van Asch y Buma, 1997, Tsarapas et al. 2002), se utilizan técnicas de SIG, teledetección, evaluación multicriterio y métodos diversos. Cabe señalar los de tipo geomorfológico-estadísticos (Baeza y Corominas, 2001; Carrara et al., 1995) y los deterministas (Van Westen y Terlien, 1996; Preston y Crozier, 1999). Se han conseguido buenos resultados predictivos por métodos mixtos y empíricos como el del modelo del estado de agua antecedente, desarrollado por Crozier (1999) en Wellington (Nueva Zelanda) aunque, rara vez se han aplicado a carreteras o pistas forestales hasta el momento.

A pesar de su elevado rigor y complejidad, los análisis del factor de seguridad y los modelos hidrológicos, tienen importantes limitaciones (González y Lima, 1999 y 2001; Lain Huerta, 2002). Son análisis en dos dimensiones para problemas en un espacio tridimensional más complejo. La geometría de los procesos y de las formas derivadas de ellos no se ajustan a las figuras, prismas u ortoedros considerados en la bibliografía. A menudo se acercan más a figuras complejas como el ovoide o elipsoide, o a paraboloides de los que formarían parte. Sus mecanismos conciernen a un gran número de factores muy difíciles de medir. Existen parámetros muy fluctuantes como la presión porosa del agua, existen fuerzas picos y residuales y el factor de seguridad calculado puede estar dentro de un margen de error de más menos 10 %. Por todo ello y desde nuestras propias limitaciones, es más accesible evaluar la estabilidad de las laderas con mapas de peligrosidad más generales.

Un interés especial tienen los estudios que intentan valorar el efecto de lo que se han dado en llamar zonas críticas, es decir aquellas áreas de las pistas forestales que se encargan de aportar los mayores volúmenes de sedimentos. Rice & Lewis (1986) encontraron que sólo un 0.6% de la longitud de las carreteras estudiadas aportaban la mayor parte de la erosión.

Los impactos de las pistas forestales y carreteras a escala de cuenca han sido

estudiados en los últimos 50 años con cierta intensidad. Se han utilizado pequeñas cuencas experimentales, donde, además del efecto de las carreteras, se añadían otras intervenciones antrópicas como repoblaciones forestales o prácticas silvícolas. Es necesario destacar en este sentido los trabajos de Thomas & Megahan (1998), en Oregón; Ziemer (1981 y 1998), en el norte de California; King & Tennyson (1984), en Idaho; Swank et al. (1982) y Swank (1988), en el sur de los Apalaches; Hornbeck et. al (1997), en el norte de los Apalaches; y Wemple (1994), en el Pacífico Noroeste y Montañas Rocosas. La mayoría de estos estudios comparan las tasas de erosión antes y después de la construcción de las pistas. Otros analizan la producción de sedimentos en cuencas con distintas densidades de pistas y de tráfico para compararlas y valorar sus efectos sobre los ecosistemas marinos (Anderson & McDonald, 1998).

Un número más reducido de estudios consideran el papel de las redes de carreteras en el direccionamiento del agua a través de la cuenca en distintos ambientes y posiciones de ladera. Montgomery (1994) investigó el efecto de las pistas de cumbres en la inicialización de canales y Wemple (1994) la magnitud y el alargamiento de la red de drenaje causada por estas infraestructuras.

Basándose en estudios en pequeñas cuencas se ha evaluado el efecto de las carreteras en los picos de crecidas después de las tormentas. En algunas cuencas se detecta un adelanto en el tiempo del pico de crecida tras la construcción de la pista (Harr et al., 1975; Jones & Grant, 1996; Thomas & Megahan, 1998). A partir de este tipo de estudios sobre respuesta hídrica, se ha llegado a la conclusión de que el efecto de las pistas en el régimen fluvial es mucho menor que el de otras acciones antrópicas (trabajos de tala, por ejemplo). No obstante, las repercusiones a medio plazo pueden ser más intensas porque las pistas modifican los cursos de agua. Los factores que condicionan los efectos hidrológicos de las pistas son: el tamaño de la cuenca ocupada por las pistas, la localización de éstas en las laderas, las características del perfil de los suelos, la intercepción de los cursos de agua subsuperficiales, y el diseño y distribución de los drenajes.

Pocos estudios han evaluado a largo plazo y a escala de cuenca los cambios en la producción de sedimentos de las carreteras o pistas cuando éstas son abandonadas, cerradas o restauradas. En el Parque Nacional de las Sequoyas (EEUU) se han desarrollado y aplicado técnicas de restauración tras el cierre de pistas y carreteras.

También se programó un sistema de evaluación del éxito de los trabajos para el control de la erosión (Ziemer,1997).

El interés despertado por las consecuencias geomorfológicas e hidrológicas de la instalación de pistas forestales en áreas de montaña ha animado a la comunidad científica a incorporar parte de los resultados más recientes en un monográfico editado por la prestigiosa revista "Earth Surface Proceses and Landforms" (2001, vol. 26). También pone de manifiesto la preocupación por esta temática la recopilación bibliográfica del monográfico "Forest Roads: A Syntesis of Scientific Information" realizado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 2001).

Las referencias bibliográficas sobre los problemas geomorfológicos que ocasionan las pistas forestales en España no son tan abundantes como en otros países. Una perspectiva general sobre los efectos de las carreteras de montaña puede encontrarse en Folch i Guillen (1977). La aplicación de la normativa europea sobre Evaluación de Impacto Ambiental y los consiguientes Estudios de Impacto Ambiental impulsó la publicación de la guía de Suárez Cardona (MOPU, 1989) sobre vías de comunicación. Haigarth et al. (1993) trabajaron sobre procesos de erosión vinculados a una pista forestal en Picos de Europa y Jardí et al. (1996) evaluaron el impacto producido por la apertura de una pista forestal en la comarca del Maresme (Barcelona).

Desde la perspectiva de la ingeniería de montes destaca el artículo de Tolosana (1993), que aborda, de modo integral, los impactos en el medio ambiente de las pistas forestales. La clasificación de pistas o caminos forestales fue abordada por Elorrieta (1989) en una comunicación interna de la ETSIM. Este mismo autor está desarrollando un proyecto de investigación sobre el diseño de los drenajes en pistas forestales dentro del Programa Nacional de Recursos y Tecnologías Agroalimentarias. También algunos artículos de revistas en el ámbito de la ingeniería de montes han tratado el impacto medioambiental de las pistas forestales (*Montes, Carreteras, Mapping*...).

En la Universidad de la Rioja (Área de Geografía Física) y en el Instituto de Estudios Riojanos (Gobierno de La Rioja) está abierta una línea de investigación centrada en el estudio de los procesos de erosión en pistas. Una parte de los resultados obtenidos hasta la fecha quedan recogidos en varias de publicaciones (Arnáez, 1987a; Arnáez, Larrea & Ortigosa 1991; Larrea Sáenz & Arnáez 1994; Arnáez & Larrea 1994 y 1995; Larrea

Sáenz, Arnáez & Ortigosa, 1995; Larrea Sáenz & Arnáez, 1996; Arnáez et al., 2003) y en los resultados y conclusiones de este trabajo.

3. Objetivos del estudio

El objetivo principal de esta Tesis es el avance en el conocimiento de la dinámica geomorfológica derivada de la construcción de pistas forestales en el Sistema Ibérico riojano (Sierra de la Demanda y Cameros). Nuestra atención se ha centrado en la descripción y cuantificación de los procesos de erosión que, especialmente, se activan en el corte-talud, que se configura al construir la pista, y en el talud inferior, localizado aguas abajo de la calzada y formado, en parte, por el material proveniente de la excavación de la ladera. También se aborda, aunque con menor detalle, la erosión en la calzada de la pista. Con la información disponible se pretende diseñar un modelo de comportamiento erosivo en las pistas forestales analizadas.

Para alcanzar este objetivo general se abordan además los siguientes aspectos:

- La distribución espacial de las pistas forestales en el Sistema Ibérico riojano. Se obtendrá, de esta forma, información sobre la intensidad de ocupación de la montaña por parte de estas vías de comunicación.
- La descripción, distribución espacial y cuantificación de los procesos de erosión que afectan a siete pistas forestales. Estas pistas son significativas del conjunto y circulan por diferentes unidades litogeomorfológicas del Ibérico riojano. La diversidad ambiental de las distintas sierras ha sido utilizada como un criterio básico e inicial para la selección de pistas.
- El papel de las escorrentías superficiales en los distintos sectores de las pistas forestales. Mediante diferentes técnicas se persigue conocer el comportamiento espacial y temporal del impacto de las gotas de lluvia (splash), del arroyamiento laminar difuso y concentrado tanto por lo que respecta a la generación de escorrentía como a la producción de sedimentos.

- La incidencia de los movimientos en masa en las pistas forestales. Se describirán las características generales de estos procesos y se cuantificarán los volúmenes de material que movilizan. Dadas sus repercusiones negativas, se intentará formular ecuaciones capaces de cuantificar los volúmenes desprendidos y definir modelos predictivos de activación de movimientos en masa según determinadas variables ambientales. Se pretende en última instancia, con el manejo de datos asequibles y rápidos, disponer de información que pueda ayudar a la gestión y mantenimiento de estas vías de comunicación.
- La identificación y valoración de las relaciones que se entablan entre los procesos de erosión y los factores ambientales y topográficos, jerarquizándolos según su importancia.
- El estudio de la recolonización vegetal en los distintos sectores de las pistas: rasgos básicos, estrategias de recolonización, relaciones entre vegetación y procesos de erosión.
- El establecimiento de tipologías y modelos básicos de perfiles de pistas forestales, relacionándolos en la medida de lo posible con los procesos de erosión.
- La descripción y explicación de modelos de erosión y de funcionamiento hidrogeomorfológico en pistas, exponiendo en qué medida afectan a la dinámica de la ladera.

4. Esquema del trabajo

El estudio ha sido dividido en siete capítulos. La introducción, capítulo I, como ha podido comprobarse, enmarca de forma general y breve la problemática de las pistas forestales y plantea los objetivos principales del trabajo.

En el capítulo II se describen los métodos empleados en el estudio. Como veremos más adelante, éstos incluyen un laborioso trabajo de campo, en el que se ha recogido información a partir de distintas técnicas, algunas de ellas experimentales, y otro de gabinete (recopilación bibliográfica, análisis estadísticos, consulta de fotografías aéreas, sistema de información geográfica, etc).

El capítulo III presenta de un modo escueto las características generales del área de estudio (Sistema Ibérico noroccidental), intentando remarcar las diferencias medioambientales que se establecen entre el sector occidental, central y oriental, diferencias que han sido valoradas a la hora de seleccionar las pistas. También se describe, a pesar de la escasa información disponible, la distribución y densidad de pistas en el área de estudio.

Seguidamente, en el capítulo IV, se describen las características generales de las pistas forestales estudiadas. En una primera parte se hace referencia a las condiciones ambientales y a las características de las laderas por donde discurren las pistas. También se alude al diseño técnico de las mismas. En una segunda parte, y en una escala más de detalle, se abordan la morfometría, la tipología de perfiles y el recubrimiento vegetal en los tres sectores que componen las pistas.

El capítulo V aborda la dinámica geomorfológica de las pistas forestales. Considerando la existencia de tres sectores muy definidos (corte-talud, calzada y talud inferior) se presentan los procesos de erosión generados en cada uno de ellos. De entre todos los procesos observados se hace especial hincapié en el arroyamiento (concentrado y laminar) y en los movimientos en masa. Del primero se han obtenido resultados de generación de escorrentía y tasas de erosión. Los movimientos en masa se estudian a partir del material movilizado. Se discuten los factores de control y se establece una tipología de movimientos en masa. Por último, se realiza una cartografía de movimientos en masa que relacionada con determinados factores ambientales a través de un sistema de información geográfica nos ayuda a establecer mapas de riesgo.

En el capítulo VI se discute el modelo de erosión en pistas forestales del Sistema Ibérico riojano mostrando la forma en la que se interrelacionan dentro del sistema pista los procesos de erosión de los tres diferentes subsistemas (corte-talud, calzada y talud inferior). También se añadirán los factores que hacen posible la existencia de estos procesos.

Por último, en el capítulo VII, se exponen una serie de conclusiones y valoraciones finales. Se aportan una serie de ideas básicas que pueden contribuir a la mejora en el rediseño, restauración o reconstrucción de pistas o carreteras de montaña.

La Tesis finaliza con una relación bibliográfica. En ella se encuentran incorporados los artículos básicos utilizados para la realización del trabajo. Todos ellos se ha hecho imprescindibles para encuadrar la investigación en un marco más amplio y disponer de datos sobre los impactos geomorfológicos de las pistas y carreteras de montaña de otras regiones del planeta.

MÉTODOS

La metodología empleada en este estudio ha abarcado cuatro tipos de tareas relacionadas:

- recopilación de bibliografía especializada,
- trabajo de campo,
- tratamiento estadístico y espacial de la información, y
- análisis e interpretación de los resultados obtenidos a partir de las tareas anteriores.

2.1. Recopilación de bibliografía especializada

La bibliografía consultada se centró, en una primera fase, en la lectura de obras de carácter general relacionadas con la dinámica geomorfológica de laderas, deteniéndose con especial interés en todas aquellas que hacían referencia a su funcionamiento hidrogeomorfológico. Se llevó a cabo, además, una recopilación y lectura de artículos relacionados con la construcción y posterior evolución de carreteras, pistas y vías de saca en montaña. Con detenimiento fueron estudiados los trabajos que hacían referencia al impacto ambiental de las pistas de montaña y, sobre todo, los que evalúan los problemas de erosión activados en las distintas secciones de las pistas (taludes y calzadas) a partir de distintas técnicas y enfoques metodológicos. Especial interés tuvieron las publicaciones que relacionan la producción de sedimentos en las pistas a partir de diversos factores ambientales, y aquellas que incorporan metodologías apoyadas en SIG.

2.2. Selección de las pistas forestales a estudiar

El trabajo de campo comenzó después de la elección de las pistas forestales que iban a ser objeto de nuestro estudio. Tomando como base la heterogeneidad ambiental de la montaña riojana se seleccionaron siete pistas que discurren por sierras con características geoecológicas diferentes (ver capítulo III):

- Sierra de la Demanda (materiales paleozoicos e influencia atlántica).
    1. Pista de Valgañón-Ezcaray (P1)

- Cameros (materiales mesozoicos del Cretácico y Jurásico, con una influencia mediterráneo-continentalizada).

    2. Pista de Hoyos de Iregua (P2)

    3. Pista de Nieva-Gamellones (P3)

    4. Pista de Zenzano (P4)

    5. Pista de Sta. Marina (P5)

- Montaña oriental (influencia mediterránea y materiales cretácicos).

    6. Pista de Cornago-Alcarama (P6)

- Conglomerados de borde de cuenca (Terciario de la Depresión del Ebro).

    7. Pista Ocón-Arnedillo (P7)

2.3. Variedad y distribución de las formas y procesos de erosión

El primer reto fue conocer la variedad y distribución de las formas y procesos de erosión en las pistas forestales. Para ello se delimitaron en cada pista un conjunto de transectos o segmentos de 20 m que sirvieron para la recogida de los datos. El número de transectos y la distancia entre los puntos de muestreo, elegidos a partir de la fotografía aérea (vuelos 1977, a escala 1:18.000), fue variable en relación con la longitud de cada pista. Por ejemplo, los segmentos estudiados en la pista Valgañón-Ezcaray, con 17 kilómetros, fueron 10, mientras que en la de Nieva-Gamellones se trabajó en 5 al contar con una longitud de 5.4 kilómetros (Tabla 2.1). Los transectos, además, representaban una amplia variedad de ambientes: diferentes altitudes, exposiciones, contextos topográficos, tipos de vegetación y usos del suelo. En total se dispuso de 59 transectos para cada uno de los sectores de la pista: corte-talud, calzada y talud inferior (177 fichas de trabajo).

La información recogida en los transectos puede agruparse en 4 categorías: a) datos de carácter general; b) variables ambientales; c) características de la ladera y pista; y d) formas y procesos de erosión.

Tabla 2. 1. Puntos de muestreo

Pista	nº transectos	distancia entre transectos
Valgañón-Ezcaray	10	1700 m
Hoyos de Iregua	9	1600 m
Nieva-Gamellones	5	1000 m
Zenzano	9	1600 m
Sta. Marina	8	1400 m
Alcarama	9	1400 m
Ocón-Arnedillo	9	2000 m

a) Datos de carácter general. Los datos de carácter general permiten localizar el transecto y la pista con facilidad, así como disponer de información complementaria que ayuda a perfilar la importancia de los procesos de erosión. En concreto, en la ficha de campo se recogió la fecha de construcción de la pista -cuando fue posible-, los últimos trabajos de mantenimiento, que inciden en gran medida en el grado de conservación o deterioro de los taludes, y el método de construcción, apuntando todos aquellos sistemas y técnicas empleados para frenar los problemas de erosión o drenaje.

Los tipos de firme considerados fueron: gravas (pista Valgañón-Ezcaray y pista de Hoyos de Iregua), zahorras finas (arenas y gravillas finas que permiten una buena nivelación previa a los trabajos de asfaltado: pista de Santa Marina), terreno natural estabilizado por motoniveladoras sobre materiales diversos (pistas de Zenzano, Ocón-Arnedillo y Alcarama), y terreno natural sin estabilizar (tan sólo abierto y consolidado por la maquinaria de construcción o tránsito de vehículos, sin explanación especial o nivelación alguna: trocha de Nieva a los Gamellones o del Refugio de Cazadores en Hoyos). Con el paso del tiempo los trazados de algunas de estas pistas y sus firmes han sufrido variaciones.

b) Variables ambientales. La recogida de datos correspondientes a las variables ambientales tiene como objeto conocer el contexto geoecológico por el que discurren las pistas forestales. Además ayuda a comprobar las relaciones que estas variables tienen en la activación de los procesos. Tres han sido valoradas con especial importancia: la altitud, indicadora indirecta de las condiciones climáticas, la litología, y los tipos de vegetación o usos del suelo que se encuentran ladera arriba y ladera abajo de la pista. Para facilitar la recogida de datos de este último factor se han

establecido los siguientes grupos: bosque, matorral (alto y bajo), herbáceas (prados) y bancales abandonados.

c) Características de las laderas y pista. Se estimó necesario incluir información sobre las características de la ladera donde se instala la pista forestal (pendiente general, pendiente ladera arriba y ladera abajo de la pista, exposición y forma de la ladera) así como de las características morfométricas de los tres sectores de la pista. El corte-talud o talud superior, que se denomina a lo largo del trabajo T1, es fruto de la labor de las máquinas al abrir la pista en la ladera. Presenta un talud, a modo de muro, con fuerte inclinación y escasa cubierta vegetal. El talud inferior, T2 en el trabajo, se configura aguas abajo de la calzada con el material extraído de la construcción de la pista. Las variables consideradas en cada uno de los transectos fueron (Fig. 2.1):

En T1 y T2,

1. Longitud del talud
2. Altura con respecto a la calzada (T1)
3. Ángulo del talud
4. Porcentaje de cubrimiento vegetal y tipo de vegetación.

   Para este último aspecto se realizó un muestreo utilizando una retícula de 0.5 x 0.5 m, situándola a 2, 11 y 18 m del punto inicial del transecto y a distintos niveles -superior, medio e inferior- del talud. Se registraron datos cuantitativos (porcentaje de cubrimiento) y cualitativos (tipos de vegetación). También se recogieron datos sobre la capacidad invasora en la calzada de la pista desde sus márgenes y tipos de especies.

En el piso o calzada de la pista,

1. Anchura
2. Pendiente longitudinal
3. Pendiente transversal (desde T1 hacia T2)
4. Anchura de la cuneta o canal de drenaje
5. Profundidad del canal de drenaje
6. Anchura de las incisiones
7. Profundidad de las incisiones

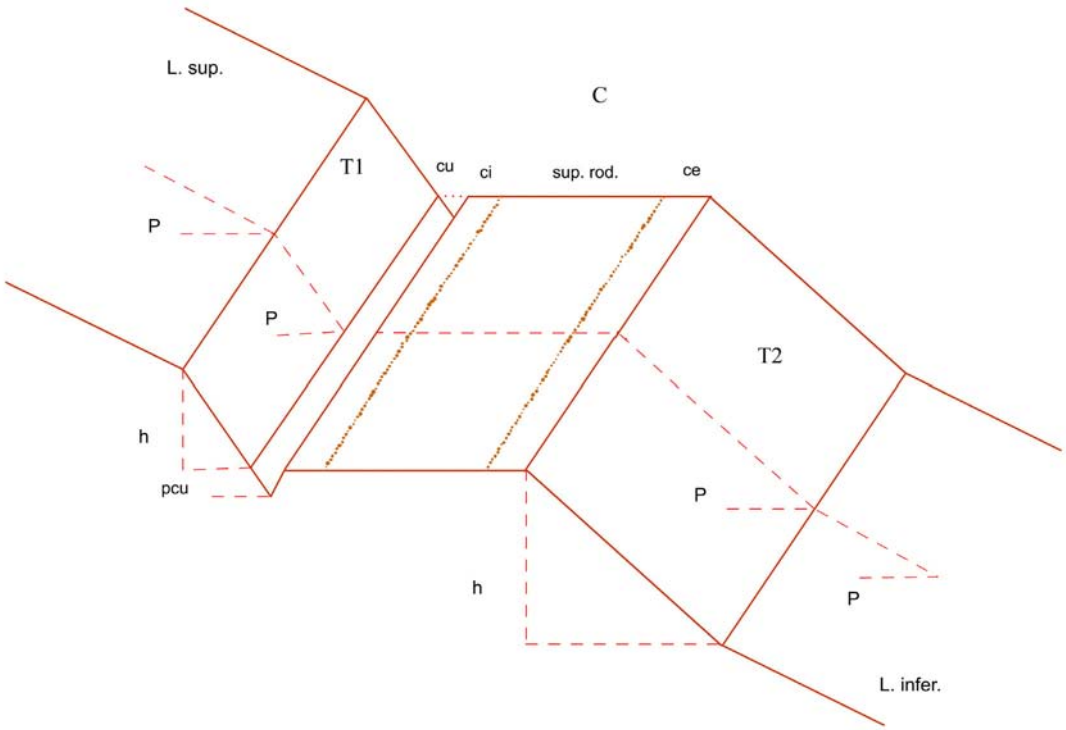


Fig. 2.1. Algunas variables morfotopográficas de los transectos estudiados

(L. sup= ladera superior; P= pendiente; T1= corte-talud; h= altura; cu= drenaje; pcu= profundidad de drenaje; ci= calle interior; C= calzada; sup. rod.= superficie de rodadura; ce= calle exterior; T2= talud inferior; L. Infer.= ladera inferior)

Por último, se elaboraron los perfiles de los transectos de las pistas forestales. Con la ayuda de un clinómetro y una cinta métrica se anotaron las pendientes de los distintos microsectores de los taludes de las pistas así como su longitud (Fig. 2.2). Esto nos facilitó la clasificación de los perfiles y el dibujo individualizado de su trazado apoyándonos en un programa de ordenador diseñado a tal efecto (Fig. 2.3).

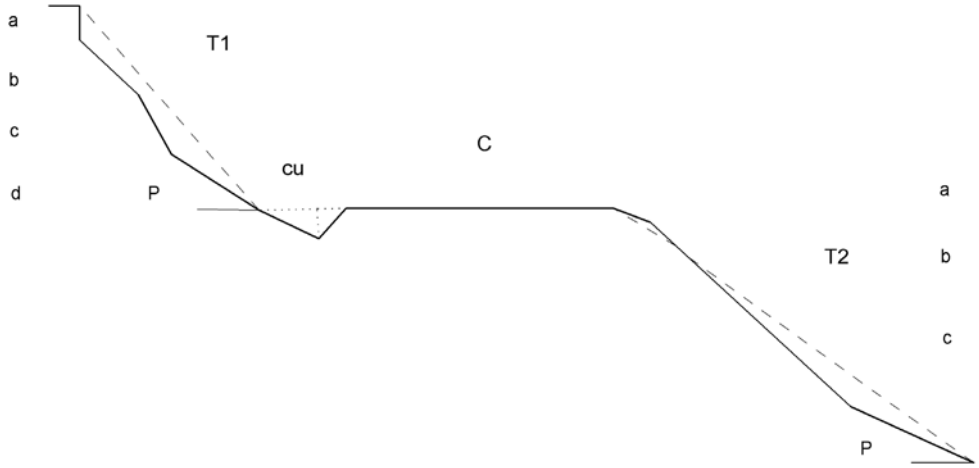


Fig. 2.2. Elaboración de perfiles de los transectos de las pistas

(a, b, c, d= sectores de los taludes en los que se anotaban longitud y pendiente; P= pendiente media de los taludes; cu= cuneta o canal de drenaje en el que se anotaron anchura y profundidad; C= anchura de la calzada con su pendiente transversal y longitudinal)

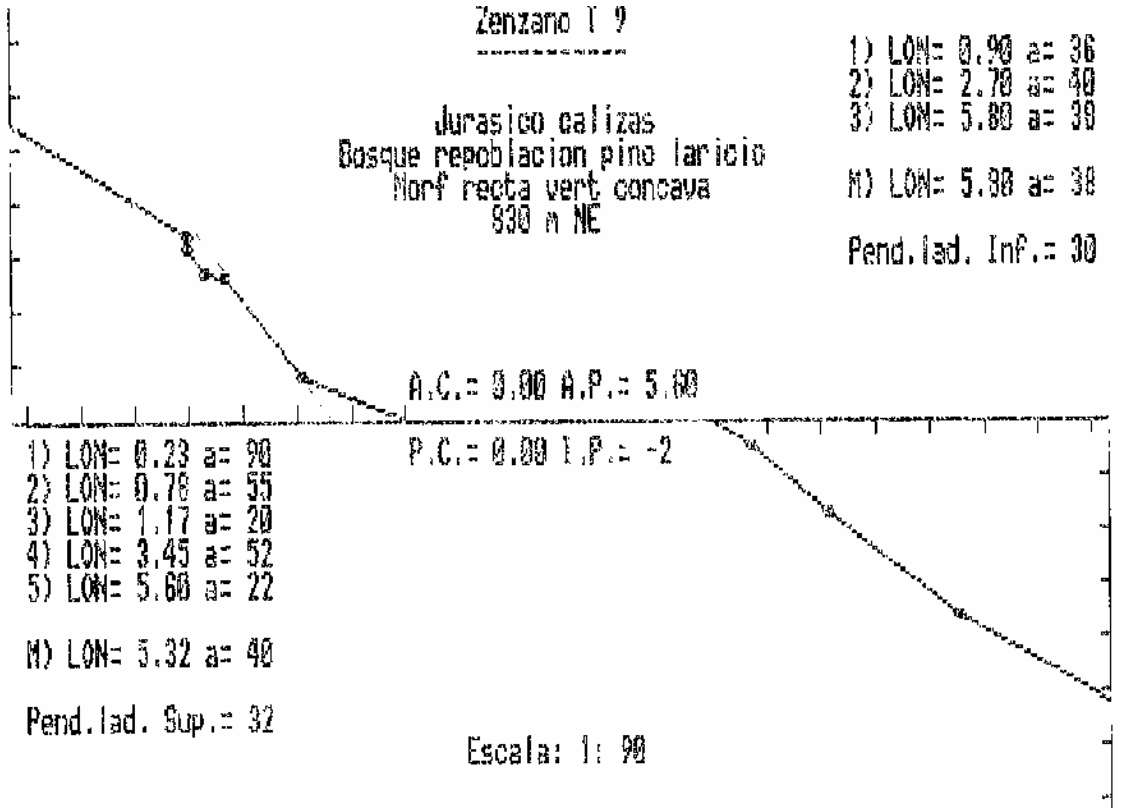


Fig. 2.3. Levantamiento de perfiles mediante un programa específico diseñado en “basic”

d) Formas y procesos de erosión. El estudio de los procesos de erosión en cada transecto era, sin duda, la labor más importante para nuestros objetivos. En primer lugar, se elaboró una clasificación de microambientes geomorfológicos que nos permitiese agrupar la diversidad de formas y procesos que actuaban **en los taludes**. Esta labor previa se hizo para simplificar al máximo el trabajo de recogida de información. Fueron consideradas las siguientes categorías o microambientes tanto para el corte-talud (T1) como para el talud inferior (T2).

Erosión nula**.** Dentro de esta categoría fueron incorporados todos aquellos segmentos de los taludes que no presentaban problemas de erosión. Habitualmente se encuentran cubiertos por la vegetación que ha impedido la actuación de las escorrentías o la generalización de los movimientos en masa. Este tipo de taludes es propio de pistas antiguas donde la recolonización de la vegetación ha sido muy satisfactoria ayudada por unas buenas condiciones de humedad ambiental y edáfica.

Arroyamiento difuso severo (Fotos 2.1). Frecuentemente los taludes no presentan huellas de incisiones profundas ni de movimientos en masa (cicatrices o acumulaciones). No obstante, una detenida observación descubre manifestaciones de la actuación de la erosión laminar o del arroyamiento difuso: alto porcentaje de piedras, que quedan resaltadas por el lavado de los materiales finos, microcanales trenzados que reconducen parcialmente las escorrentías, o raíces de plantas en superficie como consecuencia de la lenta evacuación del suelo. Estos taludes se encuentran prácticamente desprovistos de vegetación, por lo que se facilita la circulación de la escorrentía superficial proveniente de la ladera.

Arroyamiento difuso débil (Foto 2.2). Se aplica este término a aquellos taludes que se encuentran a medio camino entre los afectados por la erosión nula y el arroyamiento difuso severo. En ellos se observa un cierto cubrimiento vegetal, aunque no es suficientemente denso como para evitar la pérdida de suelo.

Caída de rocas (Foto 2.3). En muchos casos las pistas forestales atraviesan estratos o sectores rocosos duros (cuarzoarenitas, calizas etc.) que llegan a configurar un escarpe en el sector superior del corte-talud (T1). Estos materiales resistentes, aunque muy diaclasados por la tectónica y los trabajos de construcción de la pista, pueden verse afectados por la meteorización que favorece la caída individual de pequeños bloques. Éstos se acumulan al pie de los taludes, llegando a configurar pequeños conos o microtaludes de derrubios. En el talud inferior se asignó esta

categoría a aquellos casos en los que se detectaban una cierta inestabilidad del talud con movimiento individualizado de rocas o gravas a favor de la pendiente.

Deslizamientos (Fotos 2.4 y 2.5). Se agrupan en esta categoría los procesos que implican el arranque y desplazamiento de parte del material de los taludes. Configuran un nicho o cicatriz de arranque, de forma generalmente cóncava y semicircular. El plano de despegue puede ser planar o rotacional. Los primeros son los más frecuentes, de menores dimensiones y superficiales mientras que los segundos son de mayores dimensiones y profundos. Al pie del deslizamiento se deposita el material movilizado, que incorpora en algunos casos árboles y arbustos. Este material puede llegar a interrumpir la circulación de vehículos (Fig. 2.4).

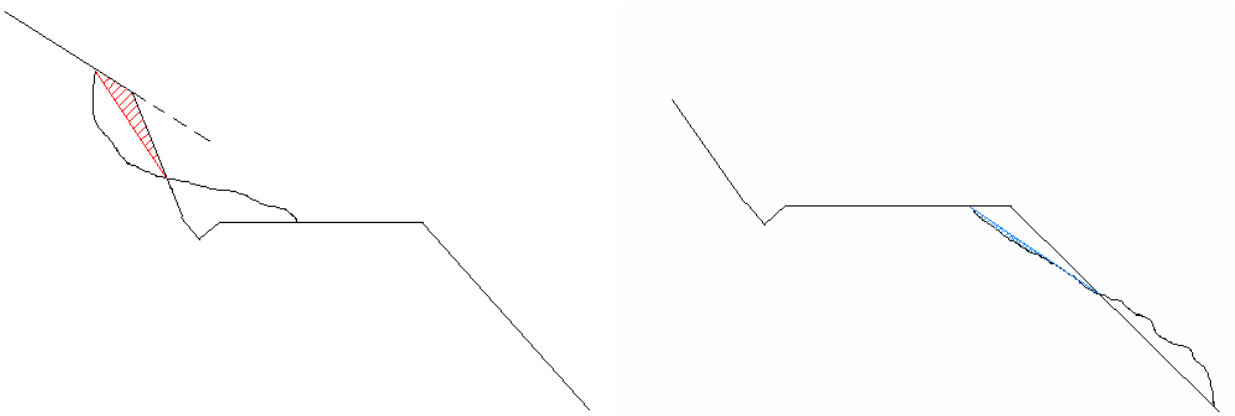


Fig. 2.4. Perfiles de movimientos en masa en los taludes de las pistas forestales

Los escarpes del nicho de arranque suelen retroceder aguas arriba como consecuencia del desplome de pequeños paquetes de suelo. Esta erosión remontante alcanza la ladera incrementando la longitud y disminuyendo el ángulo del talud (Arnáez Vadillo, 1984). Cuando un conjunto de deslizamientos aparecen conectados, el talud adquiere un alto grado de deterioro. El material deslizado bloquea los drenajes de las cunetas impidiendo la circulación del agua que, cuando se desborda, provoca incisiones en la calzada de la pista.

En esta categoría también se han incluido otros tipos de movimientos en masa menos habituales:

a) Coladas de barro (Foto 2.6). Se aprecian en ambos taludes, aunque son más abundantes en el corte-talud (T1) donde la pendiente es mayor. Suelen actuar en materiales arcillosos. Surgen también a partir de un nicho de arranque y presentan una lengua estrecha y alargada.

b) Coladas de barro y piedras (Foto 2.7). Presentan características similares a las anteriores aunque incorporan un alto porcentaje de clastos. Son frecuentes en las pistas que circulan por los materiales morrénicos en Hoyos de Iregua o por el manto de derrubios de la Sierra de la Demanda.



Foto 2.1. Arroyamiento difuso severo en un talud inferior (T2). Pista Santa Marina (P5).



Foto 2.2. Arroyamiento difuso débil en T1. Pista Ocón-Arnedillo (P7).



Foto 2.3. Caída de rocas en T1. Pista Cornago-Alcarama (P6).



Foto 2.4. Deslizamiento planar en un ramal. Pista Collado Iguareña. Valgañón.



Foto 2.5. Deslizamiento rotacional. Pista Hoyos de Iregua (P2).

Foto 2.6. Coladas de barro en T1. Pista forestal de Santa Marina (P5).





Foto 2.7. Colada de barro y piedras en T2 . Pista Hoyos de Iregua (P2).

Incisiones (Foto 2.8). En algunos taludes la escorrentía superficial ha desarrollado pequeñas incisiones o regueros de centímetros de profundidad que, en algunas ocasiones, logran evolucionar a pequeñas cárcavas. Para algunos autores el paso del arroyamiento laminar a la incisión es favorecido por las grietas de desecación que en una primera fase suelen dar paso a microincisones (Haigh, 1978). Durante lluvias de fuerte intensidad estas microincisiones facilitan el transporte de sedimentos, actuando en conjunción con el arroyamiento laminar. Con el tiempo las microincisiones se individualizan hasta convertirse en sistemas de erosión independientes.

Las incisiones se presentan sin jerarquizar, en materiales impermeables (arcillas, arcillas arenosas, margas, yesos, etc.) y en taludes de escasísima vegetación. Si el proceso aparece muy extendido, los taludes muestran los efectos de una alta tasa de erosión.

Las incisiones también se desarrollan en las calzadas de las pistas forestales como consecuencia de un conjunto de factores entre los que cabe destacar el diseño y construcción de las obras de drenaje a lo largo de las pistas y la densidad de circulación de vehículos.

Microprocesos de erosión. Dentro de este grupo se incluyen pequeños procesos de movilización generalizada de partículas o paquetes de material a lo largo de los taludes. Los mecanismos encargados de activarlos son diversos.

Así, la acción de las agujas de hielo (pipkrakes) permiten el levantamiento y posterior deslizamiento de partículas y agregados (Fotos 2.9 y 2.10). El trabajo continuado de estos microprocesos supone importantes pérdidas de material (Arnáez Vadillo, 1983).

En taludes saturados se detecta una lenta, pero continuada, reptación que se manifiesta por medio de pequeñas terracetas.

Las caídas de tepés también son habituales y afectan principalmente al sector superior del corte-talud (T1). Aquí las escorrentías subsuperficiales socavan el contacto entre el suelo y los derrubios o el contacto entre los horizontes del suelo. El superior queda en posición inestable, colgado en el vacío y sujeto a la ladera por las raíces de las plantas. En estas condiciones son habituales los desplomes y descensos por el corte-talud de pequeños paquetes de suelo con césped y matorral (Foto 2.11).



Foto 2.8. Incisiones en T1. Pista Santa Marina (P5). Zona de instalación de clavos en rigola e interrigola.



Foto 2.9. Pipkrakes en T1. Pista Valgañón-Ezcaray (P1).



Foto 2.10. Talud superior con fuerte pendiente afectado por pipkrakes. Pista Valgañón-Ezcaray (P1).



Foto 2.11. Caída de tepés en T2. Pista Valgañón-Ezcaray (P1).

En los taludes con abundancia de arcillas y yesos se aprecian grietas. La humectación-secado combinada con la pendiente y la fuerza de la gravedad supone un lento desplazamiento de las partículas y permite la preparación del terreno para la acción erosiva de las escorrentías.

Por último, se aprecia la presencia de huellas de animales. Son particularmente visibles las provocadas por el ganado que utiliza las pistas en sus desplazamientos y atraviesa los taludes en busca de pastos. En las zonas húmedas las pisadas de animales provocan el desplazamiento de material.

Una vez establecidas las categorías de formas y procesos de erosión, la técnica aplicada para medir la importancia relativa de cada uno fue sencilla. Consistió en extender transversalmente a los taludes una cinta métrica de 20 m de longitud. Con minuciosidad fueron anotados todos los procesos de erosión localizados a lo largo del transecto y su extensión. Esta técnica usada con anterioridad en otros estudios sobre campos abandonados (García Ruiz, et al., 1992; Ruiz Flaño, 1993) y repoblaciones forestales (Ortigosa, 1991) aporta resultados satisfactorios cuando se quiere conocer la variedad e importancia relativa de los procesos de erosión de pequeñas dimensiones.

En la **calzada de la pista** se detectan diversos problemas erosivos (desnivelaciones en los márgenes exteriores, grietas, baches, retenciones de material procedente del corte-talud, etc.) pero, sin duda, los más importantes se relacionan con los procesos de arroyamiento concentrado (incisiones) favorecidos por las deficiencias de los drenajes y/o el tránsito de vehículos (Fotos 2.12 y 2.13). De modo sistemático se anotaron las dimensiones de las incisiones. Se consideró la longitud total de las rigolas que recorrían la calzada, así como su anchura y profundidad. Con estos datos se obtuvieron las densidades de drenaje. Datos morfométricos de los baches en zonas de poca pendiente fueron también anotados en los 59 transectos. Otros datos adicionales se registraron en recorridos de exploración o reconocimiento de tipo general.

Toda la información recopilada en esta fase del trabajo fue almacenada y procesada en ordenador. Apoyados en programas estadísticos diseñados para Macintosh y PC (especialmente, SPSS) se aplicaron distintas técnicas de estadística descriptiva. Cuando ha sido necesario relacionar múltiples factores, se ha recurrido a técnicas bivariables y multivariables. En concreto, se ha trabajado con correlaciones,

regresiones, análisis de cluster o conglomerados, anovas y análisis discriminantes. La utilización de unos u otros métodos ha dependido, como es lógico, de las características de los datos y de los objetivos planteados en cada aspecto del trabajo.

Analizados los primeros resultados, se estimó necesario dirigir futuros esfuerzos al estudio detallado de los procesos relacionados con las escorrentías superficiales y a los movimientos en masa. Ambos tienen una gran incidencia en la dinámica geomorfológica de los tres sectores de las pistas forestales.



Foto 2.12. Acarcavamiento en T1 e incisión transversal en la calzada. Pista Zenzano (P4).



Foto 2.13. Incisiones longitudinales que siguen la rodadura en la calzada (P4).



Foto. 2.14. Mediciones en las agujas de erosión instaladas en T1. Pista forestal de Sta. Marina (P5).



Foto 2.15. Microparcela con clavos de erosión en T2. Pista Santa Marina (P5).



Foto. 2.16. Simulador de lluvia utilizado en las pruebas.



Foto 2.17. Microparcela para la simulación de lluvia en el sector superior de T2.

2.4. Cuantificación de la erosión por escorrentías superficiales

Para la cuantificación de la erosión en los procesos vinculados a las escorrentías superficiales se utilizaron dos técnicas: a) agujas de erosión y b) simulación de lluvia. Con la primera se buscaba conocer las tasas relativas de erosión a lo largo del tiempo. Con la segunda técnica, los objetivos eran más ambiciosos, pues se perseguía disponer de información sobre la generación de escorrentía y las tasas de erosión en los tres sectores de las pistas con tormentas de alta intensidad.

Las agujas de erosión son unos instrumentos simples y efectivos para medir pequeños cambios en la superficie del terreno (Sancho et al., 1991). El método consiste en la introducción parcial en el suelo de una aguja o clavo, y en la medición, cada cierto tiempo, de la longitud del extremo superior –el que sobresale del suelo- con respecto a la superficie topográfica. Estas mediciones nos aportan datos sobre los ascensos (sedimentación) y descensos (erosión) del terreno. Con este sistema es posible la elaboración de isolíneas de rebajamiento o acreción y la conversión en tasas de erosión, si conocemos la densidad del regolito. La técnica ha sido utilizada ampliamente tanto en el ámbito internacional (Haigh, 1977 y 1978) como en el nacional (Sala, 1982; Clotet & Gallart, 1986; Benito, 1988; y Benito et al. y 1991).

Para la instalación de los clavos se siguieron las directrices marcadas por Haigh (1977) y Sancho et al. (1991). Las agujas se clavaron en sentido perpendicular a la superficie del terreno, sobresaliendo unos centímetros para facilitar la localización y medición. En la toma de datos se utilizaron arandelas que son colocadas en el clavo en contacto con el terreno. Con un calibrador se tomaron las medidas oportunas (Foto 2.14).

La instalación de los clavos de erosión se llevó a cabo en la pista de Santa Marina que recorre un espacio de montaña mediterránea, con matorrales bajos y altos, muy alterada por la acción humana y afectada por repoblaciones forestales. En concreto, se seleccionaron dos sectores del talud inferior de la pista (T2), afectados por arroyamiento difuso severo, y uno del corte-talud (T1), recorrido por pequeñas rigolas (Fotos 2.8. y 2.15).

En el talud inferior se dispusieron los clavos en forma de malla. Los clavos estaban separados unos de otros por la distancia de un metro, y cubrían una superficie

variable. Una de las parcelas experimentales, orientada al este y a 715 metros de altitud, abarcaba una superficie de 12 m^2 (20 clavos). La otra, localizada a 915 m de altitud y orientada al oeste, abarcaba una superficie de 6 m^2 (12 clavos). En el corte-talud los clavos (9 en total) se dispusieron en forma de hilera en el interior de la rigola (4 clavos) y en una interrigola (5 clavos).

Los clavos de erosión fueron instalados en el año 1992 y se finalizó la toma de datos en diciembre de 1995.

La simulación de lluvia fue utilizada en este estudio para conocer los volúmenes de escorrentía y la producción de sedimentos en suspensión en los tres sectores de las pistas forestales a partir de precipitaciones de cierta intensidad. En concreto, se realizaron 28 pruebas de simulación de lluvia: 12 en el corte-talud (T1), 6 en el talud inferior (T2), y 10 en la calzada de la pista.

La técnica de la simulación de lluvia impide la extrapolación de los resultados a superficies amplias y no reproduce adecuadamente las condiciones reales de la precipitación. Sin embargo, su uso está bastante generalizado en los estudios de erosión, ya que ofrece muchas ventajas: es una técnica de bajo coste y facilidad de uso (Walsh et al., 1998), ofrece la posibilidad de estudiar la escorrentía y la erosión controlando algunas de las variables más importantes (Navas et al., 1990), y, sobre todo, permite la posibilidad de comparar los datos obtenidos en diferentes condiciones (Foster et al., 2000).

El simulador de lluvia utilizado ha sido descrito por Navas et al. (1990), Lasanta et al. (2000) y Ries et al. (2000). Dispone de una estructura metálica en forma de pirámide truncada que se cubre con un plástico para proteger el experimento del viento. Los pies de la estructura son extensibles para poder adaptarse a las diferentes condiciones del terreno (Foto 2.16). La boquilla que dispersa el agua se instala en la parte alta de la estructura, a una altura máxima de 3.5 metros, y está conectada a través de una estrecha manguera a una bomba de presión que, activada por un motor, está instalada junto a un depósito de agua móvil (75 litros de capacidad). La boquilla pulverizadora arroja agua directamente sobre una pequeña parcela circular de 1385 cm^2 (42 cm de diámetro) que está delimitada por un anillo metálico. Este anillo se inserta cuidadosamente en el suelo para recoger el agua de la escorrentía y los sedimentos transportados que son recogidos a la salida de la parcela en una pequeña abertura (Foto 2.17). La utilización de una parcela circular se justifica por la mejor adaptación al cono de lluvia que genera el pulverizador.

Antes del comienzo de las simulaciones se recogieron muestras de suelo en las proximidades de cada parcela y entre los 0 y 15 cm de la superficie. Estas muestras nos han permitido conocer la composición textural y contenido de materia orgánica del suelo. Los porcentajes de cubierta vegetal y de piedras fueron medidos usando un enrejado con celdas de 5 cm. Además se anotaron otras características propias de las parcelas: pendiente, orientación, morfología de la superficie (grietas, depresiones, costras, etc).

Las simulaciones de lluvia tuvieron una duración de 30 minutos y una intensidad media de 75 mm h^{-1} (CV 16%). La intensidad de la lluvia fue medida con tres micropluviómetros distribuidos sobre la parcela. El 85 % del volumen total de lluvia tenía tamaños de gota entre 0.80 y 2 mm. Los experimentos se realizaron en el verano de 1999 cuando los valores medios de humedad del suelo eran muy bajos (4.3%). Las muestras de agua y sedimentos a la salida de la parcela fueron recogidos cada 3-5 minutos. Al finalizar la simulación, la profundidad del frente de humectación de la parcela fue medido después de hacer un corte en el suelo.

Los datos recogidos en cada simulación fueron:

- Tiempo (segundos) trascurrido desde el comienzo de la simulación de lluvia hasta el comienzo de la escorrentía.
- Coeficiente de escorrentía (porcentaje de lluvia que llega a convertirse en escorrentía)
- Escorrentía media (ml s^{-1})
- Pico máximo (“peak”) de escorrentía durante la prueba (ml s^{-1})
- Profundidad del frente de humectación tras la realización de la prueba.
- Concentración media de sedimentos (g l^{-1})
- Máxima concentración de sedimentos (“peak”) (g l^{-1})
- Pérdida total de suelo (g m^{-2}).

Coeficientes de correlación y regresiones fueron utilizados para evaluar los efectos de los factores de localización de las parcelas en la escorrentía y erosión. Las variables consideradas fueron la pendiente, la orientación, la cubierta vegetal y el porcentaje de piedras que cubren el suelo. La longitud no fue incluida ya que el pequeño tamaño de la parcela no permite evaluar la relación de este factor con la escorrentía y erosión.

2.5. Movimientos en masa

Para el estudio de los movimientos en masa se seleccionaron tres de las pistas forestales de nuestra área de estudio: Valgañón-Ezcaray (P1), en la Sierra de la Demanda, Hoyos de Iregua (P2), en la Sierra de Cebollera, y Ocón-Arnedillo (P7).

En las tres pistas se contabilizaron 135 movimientos en masa con más de dos metros de anchura que se habían activado tanto en el corte-talud (T1) como en el talud inferior (T2). Se consideraron como movimientos en masa, en primer lugar, los deslizamientos que implican un masivo descenso de materiales relativamente cohesionados a la largo del talud. Dejan una cicatriz con una superficie de desplazamiento plana o curva. Al pie del deslizamiento se deposita el material movilizado que puede bloquear los drenajes o invadir la calzada de la pista.



Foto 2.18. Deslizamiento planar en Hoyos de Iregua. P2-TS10



Foto 2.19. El mismo deslizamiento semanas después. Verano 2002

En los taludes de las pistas que discurren por rocas arcillosas o margosas con suelos temporalmente muy húmedos se pueden observar coladas de barro. Se aprecian en el corte-talud (T1) y en el talud inferior (T2), aunque son más abundantes en el primero donde la pendiente es mayor. Surgen a partir de un nicho de arranque y presentan una lengua estrecha y alargada. Estos procesos son habituales en los taludes de pistas forestales que discurren por los pisos supraforestales de las montañas más occidentales de La Rioja.

Por último, las caídas de rocas alcanzan un importante desarrollo en pistas donde las condiciones topográficas y litológicas lo permiten. Dan lugar a conos o taludes de derrubios que se mantienen hasta que son eliminados por los equipos de mantenimiento de las pistas. Estos procesos han sido incluidos en el estudio cuando se han activado de forma masiva dejando una clara cicatriz o zona de arranque y no cuando son fruto de una acumulación progresiva de bloques y rocas más o menos individualizadas. Obviamente ambos mecanismos se combinan y es difícil diferenciarlos en muchas ocasiones. En el área de estudio se distinguen dos grupos: aquellos que parten de estratos o masas rocosas en cortes de gran pendiente creados por la construcción de la pista, y aquellos otros que surgen de los canchales seccionados por las pistas.

Algunos movimientos en masa de difícil catalogación, al estar desfigurados por el arroyamiento superficial, la reptación, las pisadas de animales, las caídas de tepes, la recolonización vegetal o las labores de reacondicionamiento de la pista, fueron descartados.

El funcionamiento hidrogeomorfológico de la ladera explica en gran parte la génesis de estos procesos. La alta capacidad de la infiltración, las precipitaciones intensas, la fusión nival o la proximidad de las pistas a los fondos de barranco juegan un papel decisivo en el desencadenamiento de movimientos en masa.

Cada uno de los movimientos en masa fue catalogado y caracterizado a partir de un minucioso trabajo de campo. En concreto, la ficha de campo incluyó la siguiente información:

Datos de la pista:

- Generales: año de construcción, estado de conservación y tareas de mantenimiento.
- Características técnicas: longitud, anchura, altitud máxima y mínima, trazado en la ladera, diseño y tipo de firme, y existencia o no de cunetas.
- Características de las laderas por donde discurre la pista: pendiente (20 metros aguas arriba del corte-talud y aguas abajo del talud inferior) exposición, forma de la ladera, cubierta vegetal, litología y tipo de suelo.

Datos de los movimientos en masa:

- Tipo de proceso.
- Localización: coordenadas UTM, distancia al origen de la pista y altitud.
- Dimensiones: anchura, profundidad (en distintos puntos) y longitud de la cicatriz, longitud de todo el proceso (incluido el material depositado). También se anotaron datos sobre el retroceso o erosión remontante de algunos de los movimientos en masa. Se calculó la pendiente de la cicatriz y del proceso en su conjunto, y se anotó el porcentaje de pedregosidad de las cicatrices.
- Características del talud donde se inscribe el movimiento en masa: altura, longitud, pendiente y porcentaje de cubierta vegetal.

Las dimensiones de las cicatrices o nichos de arranque de los movimientos en masa han permitido calcular, de manera aproximada, los volúmenes de material deslizado. Se ha optado por evaluar el volumen a partir del nicho o cicatriz de arranque porque hacerlo con el depósito sedimentado, en el caso de las pistas, era prácticamente imposible. La mayor parte de los depósitos se encuentran muy alterados o han desaparecido como consecuencia de las labores de reacondicionamiento. La cicatriz tiene la ventaja de que permanece durante más tiempo inalterada, aunque, como ha indicado Haigh (1986) ofrece peores correlaciones con el volumen real movilizado. El error estimado en la medida del volumen a partir de las cicatrices frente a los depósitos fue de ± 25% en los movimientos en masa de las pistas forestales de California (Madej, 2000).

El cálculo de volúmenes de material desprendido en metros cúbicos se ha realizado simplificando éste complejo problema tridimensional, conociendo el área longitudinal de la cicatriz (AL) y la anchura del deslizamiento en su sector medio (W):

$$V\ (m^3) = AL\ (m^2) * P\ (m^1)$$

El área de la sección longitudinal de la cicatriz del movimiento en masa se ha obtenido con un programa específico confeccionado en Excel (Fig. 2.5). Éste, a partir de los datos parciales de la longitud y la pendiente de la cicatriz, dibujaba la sección longitudinal y sobre ella se calculó, con un planímetro de precisión (Ushikata X-PLAN 360), el área.

Conocido este valor, se multiplicó por la anchura del proceso en el sector medio de la cicatriz en el corte-talud (T1). Los deslizamientos del talud inferior (T2) muestran a menudo plantas en forma de “cuchara”, por lo que la anchura del sector medio de la cicatriz difería con respecto al arco superior. Por esta razón, después de realizar distintas aproximaciones con datos de campo, se consideró necesario en estos casos aplicar a la fórmula inicial el factor de corrección 0.7. De este modo, disminuiría la sobreestimación del volumen. La fórmula, pues, aplicada a los 28 movimientos en masa del talud inferior fue:

$$V(m^3) = 0.7\ AL\ (m^2) * P\ (m^1)$$

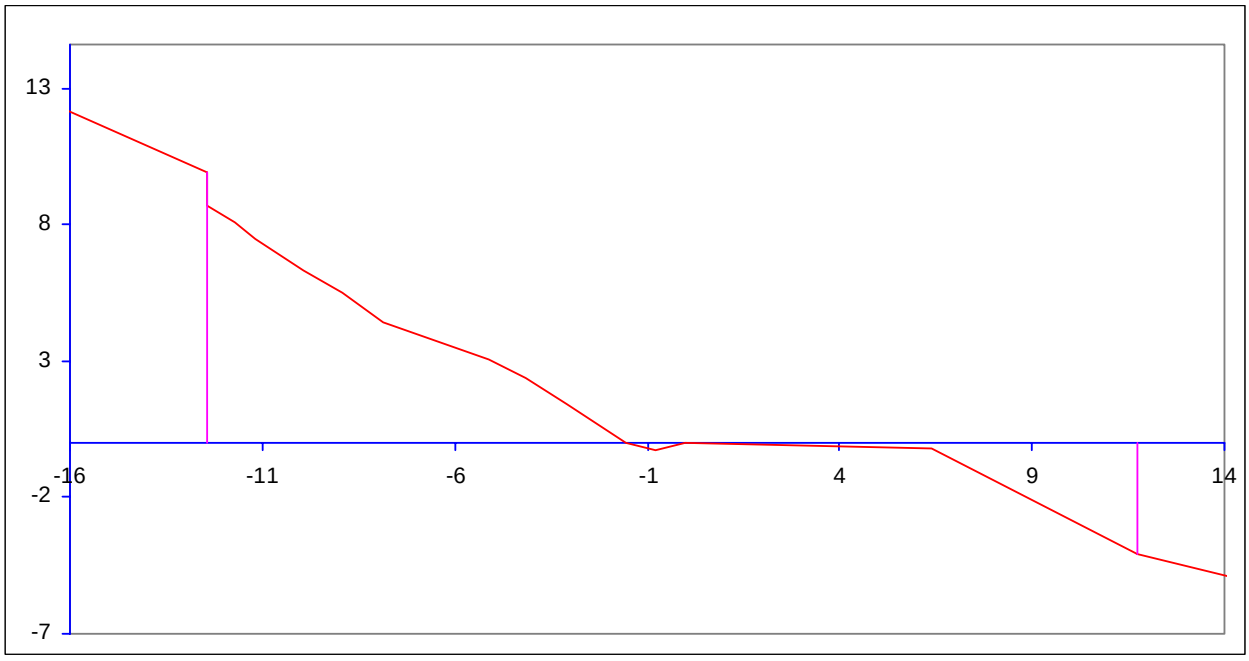


Fig. 2.5. Levantamiento de un perfil transversal de un deslizamiento en la pista de Hoyos de Iregua

Somos conscientes de las limitaciones del método empleado. La anchura, la longitud y la profundidad de estos procesos varían a lo largo del espacio tridimensional que ocupa un deslizamiento, pero la simplificación se hace necesaria para obtener con rapidez resultados comparativos y fiables. Un análisis más riguroso exigiría complejos métodos propios del campo de la ingeniería que obligarían a un enorme trabajo de

campo, a la recopilación de un gran número de datos o a la utilización de instrumental sofisticado fuera de nuestro alcance (Salinas y Velilla, 2002)

El conocimiento de los volúmenes de material desprendido y el de las variables longitud, anchura y profundidad de los nichos de arranque nos facilitaron la elaboración de una función matemática de carácter predictivo que puede ser utilizada para un rápida evaluación de los volúmenes de suelo movilizados por los movimientos en masa.

Otro aspecto considerado fue la invasión de la pista, importante en aquellos casos que los movimientos en masa de T1 superaban las cunetas, o bien, en los que reducían la calzada si se desarrollaban en T2 (Foto 2.20).



Foto 2.20. Invasión de la calzada o retroceso de un deslizamiento en T1. Hoyos de Iregua

Por último, con todos los datos obtenidos en el campo y en el trabajo de gabinete se crearon las correspondientes matrices que fueron trabajadas estadísticamente por medio de diversos programas Statview (para Mac), Excell y SPSS. De este modo, se

establecieron relaciones entre las diversas variables ambientales, características de las pistas y de los taludes con los movimientos en masa.

2.6. Cartografía de riesgos por movimientos en masa

La información recogida sobre los movimientos en masa nos animó a desarrollar una metodología sencilla y eficaz para el reconocimiento y predicción de los puntos más vulnerables en el desencadenamiento de movimientos en masa. Esta metodología se apoya en trabajos de semejantes características ya probados (Varnes, et al., 1984; Brabb, 1984; Hansen, 1984; Brabb & Harrod, 1989; Van Westen, 1993 y 1994; Carrara et al. 1995), y debe ser útil para ayudar a planificar el trazado de futuras pistas forestales o carreteras en laderas de montaña.

Esta es, sin duda, la ventaja principal que ofrece el método. Al incorporar como información básica las características de las laderas por donde discurren las pistas permite al ingeniero evaluar, antes y después de la construcción de la pista, la capacidad que esas laderas tendrán para animar la inestabilidad de los taludes. El método, pues, no pretende establecer las causas definitivas que activan los movimientos en masa en los taludes, sino el papel de las laderas en una posible estabilidad o inestabilidad de los mismos. Para alcanzar el primer objetivo se exigiría muchísima más información que no está a nuestro alcance, al requerir una costosa instrumentalización y una amplia dedicación temporal. El estudio del comportamiento de los flujos superficiales, las características estructurales y texturales de los suelos, su mecánica, la existencia o no de diaclasas en los sustratos, etc. así como la topografía específica de los taludes, serían variables imprescindibles. Este último aspecto, no obstante, podría ser solventado introduciendo estos datos a partir de ortoimágenes de alta resolución (mayor de 0.5 m).

El estudio de riesgos por movimientos en masa en taludes de pistas forestales se desarrolló en dos fases. En un primer momento, se trabajó sobre una pista forestal representativa del Sistema Ibérico riojano que, además, contaba con un buen número de movimientos en masa. Posteriormente, los resultados obtenidos fueron sometidos a una prueba de validación, partiendo del principio asumido de que los movimientos en masa de las pistas forestales son más probables en aquellas condiciones en las que ya han sucedido, si los factores últimos de la inestabilidad operan de manera parecida (Carrara et al., 1995, http://deis158.unibo.it/gis/)

La pista seleccionada fue la de Hoyos de Iregua, localizada en el alto valle del

Iregua (Sierra de Cebollera). En ella se han desencadenado 64 movimientos en masa de más de dos metros de anchura a lo largo de sus primeros 12.8 kilómetros (5 casos por kilómetro). El conjunto del área por donde discurre la pista cubre una superficie total de 7600 hectáreas.

Con la ayuda de un GPS se localizaron los 64 movimientos en masa que fueron tipificados según su volumen, cartografiados sobre la pista forestal e incorporados a un Sistema de Información Geográfica (MFWorks 2.6).

En un siguiente paso se digitalizaron o confeccionaron, a una resolución de 5x5 metros-"pixel", una serie de mapas temáticos correspondientes a algunos de los factores que, según nuestro propio estudio y la bibliografía consultada (Van Westen, 1994; Carrara, 1995; Brunori et al., 1996; Sancho Marcén, 1997; González & Lima, 2000 y 2001; Baeza y Corominas, 2001; Zhou et al., 2002; Ordóñez & Martínez Alegría, 2003), podrían influir directamente en la inestabilidad de los taludes. Lejos de nuestro alcance quedan otras metodologías presentadas por Van Westen & Terlien, (1996), Preston & Crozier (1999), Collison et al. (1995), Collison & Anderson (1996), Crozier (1999) y Van Asch & Buma, 1997.

Los mapas elaborados fueron: el litológico/geomorfológico y el de cubierta vegetal, obtenidos a partir de diferentes fuentes (ver capítulo V), y los mapas de altitudes, exposiciones, potencial hídrico, pendiente de las laderas y distancias de la pista al fondo del barranco. Estos últimos se confeccionaron a partir de un MDT elaborado a partir de la cartografía digital 1/5.000 del Gobierno de La Rioja. Los mapas temáticos fueron manipulados y cruzados por medio de un Sistema de Información Geográfica (MF Works 2.6).

Para el estudio del riesgo por movimientos en masa en los taludes de pista forestal, los 12.8 kilómetros de tramo estudiado fueron divididos en 31 unidades de ladera (UL) (Tabla 2.2). Los criterios para seleccionar y delimitar estas unidades fueron la homogeneidad de la topografía, la exposición, el perfil y la forma de la ladera. Los datos para el análisis estadístico fueron obtenidos de una franja continua situada 50 m por encima y por debajo de cada unidad de ladera, al considerar que esta banda es la que generalmente puede incidir en el desencadenamiento de los movimientos en masa de los taludes. Los datos introducidos en el ordenador correspondían a los valores medios o dominantes de cada unidad de ladera (UL). Con toda la información acumulada se llevaron a cabo diferentes análisis estadísticos multivariables (análisis discriminante y regresión logística) para comprobar cual de ellos aportaba un mayor

grado de fiabilidad. También gracias a ellos se pudo valorar, tras la delimitación de dos grupos de taludes (inestables y "resto"), el peso de cada factor o variable en relación con la distribución de estos grupos y calcular la probabilidad de pertenencia de las distintas unidades de ladera a estos grupos. A partir de esta información se pudo elaborar la cartografía de inestabilidad por movimientos en masa.

Tabla 2.2. Kilómetros, número de tramos y "pixels" analizados en la pista de Hoyos de Iregua

	Kms	N. tramos	N. pixels
Tramo de análisis (TA)	12.8	31	39.550
Tramo de validación (TV)	18.9	37	62.787
TOTAL	31.7	68	102.337

Los resultados obtenidos fueron validados en otro tramo de la misma pista forestal que recorre el arroyo de Puente Ra hasta la ermita de Lomos de Orio (Hoyos de Iregua). En concreto, se localizaron los movimientos en masa, se calculó su volumen y, tal y como se había realizado en el tramo de análisis, se transformaron los datos en m^3 de material desplazado por cada 100 metros lineales de pista y se identificaron las UL. En concreto, el tramo de validación constaba de 37 unidades de ladera, correspondientes a 18.9 kilómetros de pista.

En un intento de mejorar los resultados obtenidos y elevar el nivel de precisión se optó por aplicar un proceso de análisis muy parecido al descrito para las UL a la información aportada de forma individualizada por cada píxel (5x5 metros) localizados a 25 metros ladera arriba y debajo de la pista forestal. En este caso se incluyó un factor nuevo: la distancia precisa de cada "pixel" a la calzada de la pista y se eliminó del análisis el factor altitud muy relacionado con el potencial hídrico, dato obtenido a partir del SIG que otorga una escorrentía anual a cada celda a partir de la precipitación anual (que, a su vez, fue ajustada según una ecuación aplicada a la precipitación de la estación más próxima y la altitud) y la topografía del MDT. Este proceso aumentó considerablemente el número de casos: 20.984 para el tramo de análisis y 32.243 para el tramo de validación.

La disponibilidad de ordenadores de cierta capacidad y programas estadísticos apropiados hicieron posible el tratamiento de la información. Tanto en el método de

UL como en el de “pixels” de 5 m, las bases de datos fueron sometidas a un similar proceso de análisis estadístico:

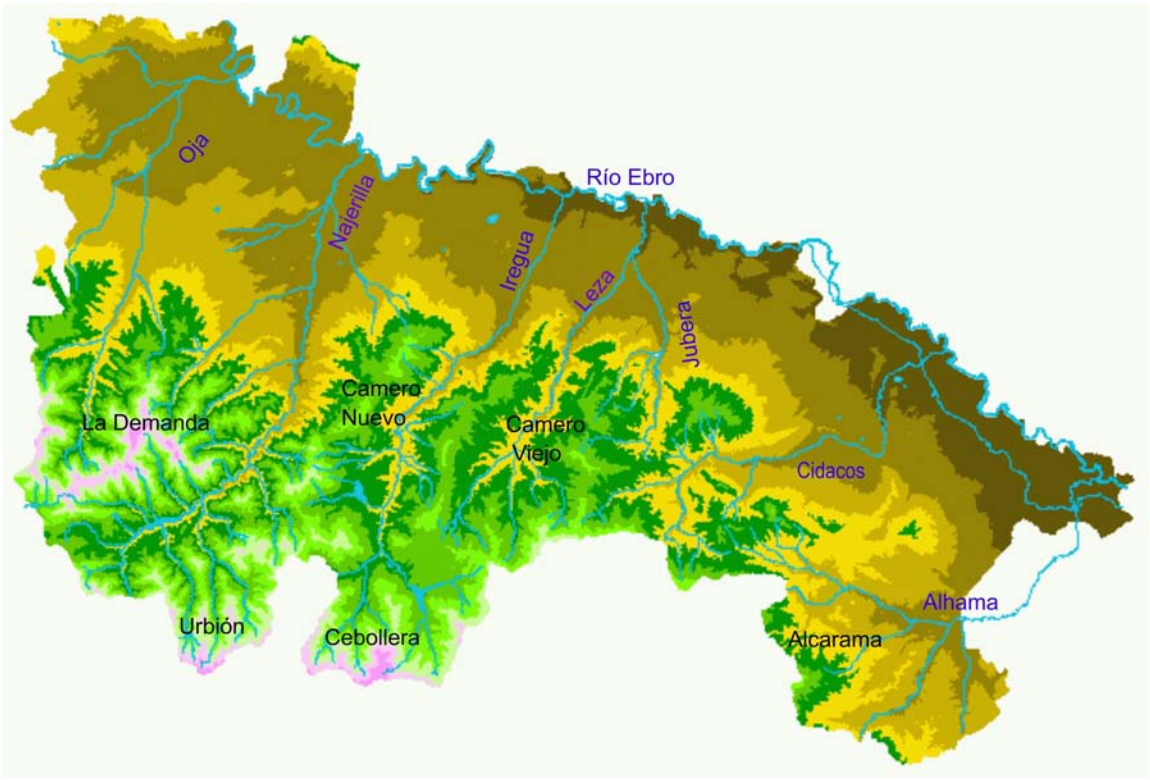
- Análisis multifactorial: análisis discriminante y regresión logística múltiple (esta última sólo en el estudio de UL).
- Clasificaciones de los grupos pronosticados y los grupos observados.
- Establecimiento de la probabilidad de inestabilidad.
- Establecimiento según el nivel de probabilidad de diferentes tipos de riesgo
- Validación del método en un nuevo tramo de pista forestal.
- Cartografía definitiva de riesgo. En el caso de los análisis “píxel” a “píxel”, se dibujó, en primer lugar, el mapa de probabilidades de asignación al grupo de inestabilidad. Después se confeccionó un mapa de riesgo según el tamaño de los deslizamientos. Mediante la combinación de ambos se obtuvo el mapa definitivo de riesgo.

ÁREA DE ESTUDIO

Antes de describir las características de las pistas forestales seleccionadas para este estudio conviene conocer los grandes rasgos del Sistema Ibérico riojano y de sus unidades principales.

3.1. Descripción general del Sistema Ibérico riojano

La presente Tesis se ha realizado en el tramo riojano del Sistema Ibérico (Mapa 3.1). Este cinturón montañoso está configurado por un conjunto de macizos cuyas líneas de cumbres disminuyen de altitud de oeste a este. Si en la Sierra de la Demanda, Picos de Urbión y Sierra de Cebollera los picos principales superan los 2000 m (San Lorenzo, 2271 m, Urbión, 2229 m, o La Mesa de Cebollera, 2168 m), en Camero Viejo y en las sierras más orientales las altitudes son más propias de la media montaña (Hayedo de Santiago, 1758 m, San Cristóbal, 1649 m, Nocedillo, 1594 m, y Alcarama, 1531 m).



Mapa 3.1. Localización de las principales unidades del Sistema Ibérico riojano

La evolución geológica del sector ha generado una gran diversidad litológica y ha estado condicionada por la proximidad del macizo meseteño y el desarrollo del ciclo alpino.

Durante el Paleozoico se depositaron los materiales resistentes y metamórficos (esquistos, pizarras y cuarcitas) que componen el macizo de la Demanda (Colchen, 1974). Estos materiales fueron primero levantados y fracturados por la orogenia herciniana, luego arrasados y sepultados por los materiales triásicos (areniscas y arcillas) y jurásicos (calizas y margas), y por último rejuvenecidos por el plegamiento alpino.

A lo largo del Cretácico, en el actual Cameros, se configura una gran cuenca sedimentaria. Los restos paleozoicos fueron cubiertos por una débil capa de sedimentos mesozoicos mientras que la cuenca camerana subsidente se rellenaba de materiales procedentes de una antigua red fluvial que tenía su cabecera en la zona del actual Sistema Central. Los sedimentos alcanzaron un espesor de 5000 metros formándose cinco grupos conocidos por los nombres de Tera, Oncala, Urbión, Enciso y Oliván (Tischer, 1966). Entre estos materiales de la facies Purbeck-Weald predominan las cuarzoarenitas, arcillas, areniscas y margas con intercalaciones de calizas. Al norte de los Cameros, por medio de una estrecha franja, afloran los materiales triásicos (yesos, margas y dolomías) y jurásicos (calizas). La alternancia litológica de los distintos materiales de sedimentación y los esfuerzos de la tectónica alpina han sido fundamentales en la creación del relieve. El flanco norte entra en contacto con la Depresión del Ebro mediante una falla cabalgante, de modo que es aquí donde se observan pliegues y fallas que compartimentan el relieve. En el interior de Cameros el espesor de los depósitos ha favorecido la formación de pliegues laxos, con buzamientos suaves.

Durante el Terciario la Depresión del Ebro se llena de sedimentos procedentes de los relieves serranos, recientemente elevados, que adoptan una disposición con cambios laterales de facies (los conglomerados sueltos más pesados se acumulan en los bordes; luego, hacia el interior, se depositan las arenas, las arcillas y los yesos en zonas lacustres) (Foto 3.1). En el Pliocuaternario el Ebro se abre paso al mar y comienza el encajamiento de la red hídrica que incrementa las pendientes y subraya la disimetría del relieve entre las vertientes norte y sur del Sistema Ibérico.



Foto 3.1. Depresión del Valle del Ebro, rampas de conexión y la Demanda al fondo.



Foto 3.2. Circo con perfil transversal en artesa en la cabecera del río Portilla. Picos de Urbión.



Foto 3.3. Circo inferior de La Gamella, vertiente oriental de La Mesa de Cebollera.



Foto 3.4. Plataforma calcárea de los Gamellones con el Moncayo al fondo.

En el Cuaternario las zonas más elevadas del Ibérico riojano (Demanda, Urbión y Cebollera) estuvieron afectadas por la acción glaciar (Fotos 3.2 y 3.3). Aquí el desarrollo de un glaciarismo de circos y valles muy cortos ha producido un relieve singular y diferenciado según la topografía y litología preexistentes (García Ruiz, 1997;García Ruiz et al. 1997). Con posterioridad, se desarrollaron procesos periglaciares y nivales, algunos de ellos todavía semifuncionales en la actualidad por encima de los 1800 m (Arnáez Vadillo & García Ruiz, 2000). También se detecta en los distintos pisos altitudinales una interesante dinámica de vertientes con caídas de rocas, incisiones, escorrentías superficiales y subsuperficiales, movimientos en masa, etc. (Arnáez Vadillo, 1987a). La incisión de la red hídrica se ha producido con una erosión diferencial que aprovecha la diversidad litológica dando lugar a profundos cañones, a menudo entre materiales cársticos (Foto 3.4)

El clima de la montaña riojana está condicionado por una serie de factores (localización, altitud, orientación o exposición) que introducen importantes matizaciones a la tendencia mediterránea dominante. En un espacio tan pequeño se encuentran diferentes modalidades climáticas. Martín Ranz & García Ruiz (1984) distinguieron cinco subtipos o subclimas en la región, tres de los cuales hacen referencia a las áreas de montaña:

1.- *Subclima de montaña mediterránea con tendencia oceánica*. La proximidad al Atlántico de la Sierra de la Demanda favorece las temperaturas frescas y las precipitaciones abundantes, especialmente durante el invierno como consecuencia del paso de frentes húmedos de componente oeste. Los vientos cargados de humedad descargan en las laderas bien expuestas al norte y noroeste mientras que las laderas a sotavento sufren un cierto efecto Föhen que se deja sentir en la cubierta vegetal del alto Oja y Najerilla.

2.- Subclima de montaña mediterránea con tendencia continental. La continentalidad en Urbión y Cebollera proporciona unos inviernos más fríos y secos. La sucesión de barreras orográficas provocada por la disposición del relieve favorece una disminución de las precipitaciones hacia el este. Los efectos solana-umbría y barlovento-sotavento

influyen en la distribución de la vegetación que tiende a presentar importantes disimetrías.

3.- Subclima de montaña mediterránea. La proximidad al Mediterráneo trae a las sierras de La Rioja Baja (altos valles del Alhama y Linares) y Camero Viejo (altos valles del Cidacos, Leza y Jubera) temperaturas más altas y menores precipitaciones, así como una marcada sequía estival. La humedad de los frentes del oeste es retenida por las barreras orográficas más occidentales. El máximo pluviométrico en Camero Viejo se alcanza en primavera, mientras que el otoño marca el máximo secundario. Este comportamiento de carácter equinoccial evidencia el marcado matiz mediterráneo de la región.

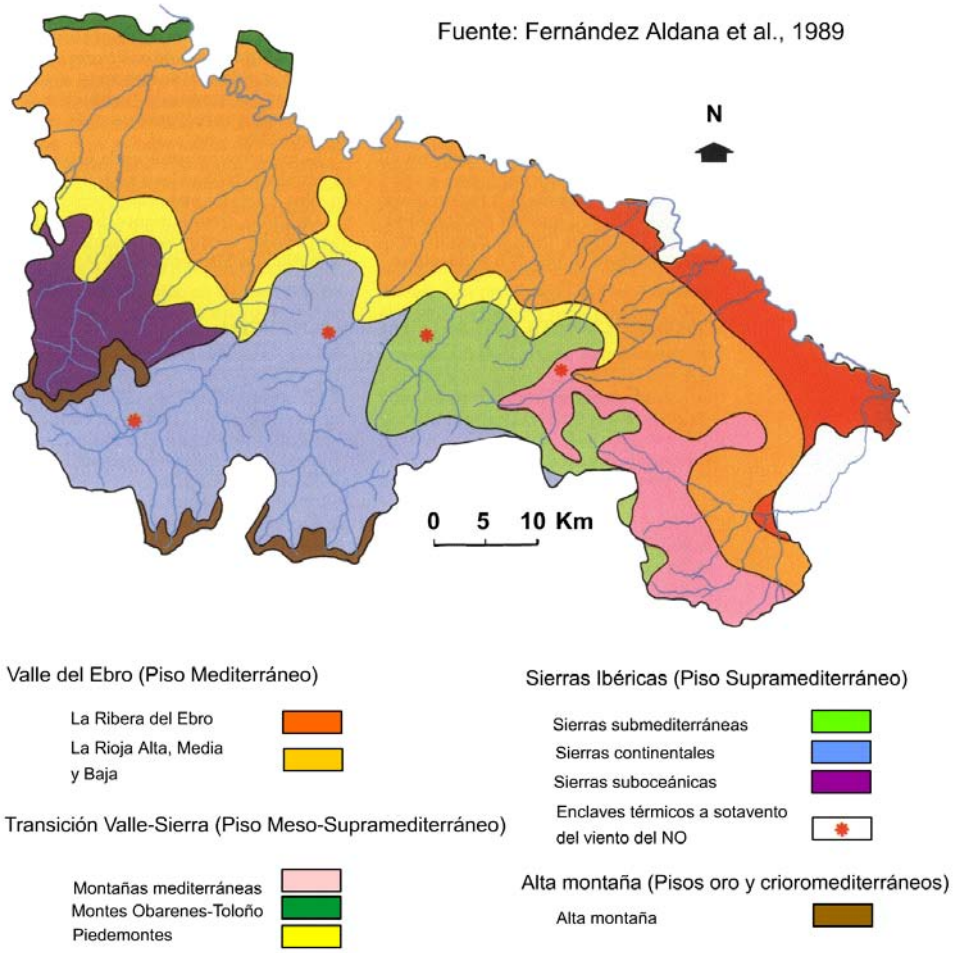
El gradiente termopluviométrico que introduce la altitud origina una organización de la vegetación en pisos. En la montaña riojana se encuentran representados cuatro pisos: mesomediterráneo, supramediterráneo, oromediterráneo y crioromediterráneo. Siguiendo a Rivas Martínez (1984) y Fernández Aldana et al. (1990), su distribución y características son las siguientes (Mapa 3.2):

1.- Mesomediterráneo seco. Se encuentra en las altitudes más bajas de las sierras más orientales caracterizadas por temperaturas medias que oscilan entre los 13 y 17º y precipitaciones de 350 a 600 mm. Aquí los bosques de carrasca *(Quercus ilex rotundifolia)* se localizan en torno a los 1000 m de altitud. El quejigo *(Quercus faginea)* ocupa zonas de umbría mientras que la coscoja *(Quercus coccifera)* o matorrales de sustitución cubren las zonas más degradadas por la acción humana.

2.- Supramediterráneo. La variante seca se encuentra representada en el valle del Leza-Jubera y en las franjas por encima de los 1000 m del Cidacos y Alhama, áreas que reciben precipitaciones anuales entre los 550 y 750 mm. Los robles se distribuyen según el suelo (el rebollo en suelo silíceo y el quejigo en calizo) pudiendo alternar con hayas *(Fagus Sylvatica)* en enclaves húmedos y protegidos. La variante subhúmeda del piso supramediterráneo, en ambientes con precipitaciones entre los 600 y 1000 mm anuales, se extiende por el alto Iregua, Najerilla y medio Oja, y la húmeda encuentra acomodo en el interfluvio Iregua-Najerilla y en la Sierra de la Demanda. En estas zonas las hayas y los robles se reparten el territorio en virtud de diversos factores aunque también están presentes carrascales y bosques mixtos.

3.- Oromediterráneo. Este piso es propio de altitudes superiores a los 1600-1700 m. Está bien representado en las Sierras de la Demanda, Urbión y Cebollera. La continentalización de la Sierra de Cebollera favorece la expansión de los pinos principalmente del silvestre.

4.- Crioromediterráneo. Se sitúa por encima de los 1900 m donde la cubierta de nieve permanece más de seis meses y el viento constituye un factor limitante de la vegetación arbórea. Aquí la vegetación se reduce a pastizales y matorrales de alta montaña aprovechados tradicionalmente por los ganados trashumantes.



Mapa 3.2. Pisos bioclimáticos de La Rioja

El Ibérico riojano ha sido ocupado por el hombre desde tiempos históricos. El espacio se organizó en función de la agricultura y la ganadería, complementándose la economía familiar con producciones artesanales. Estas actividades contribuyeron a la deforestación de las sierras.

A partir de los años setenta y ochenta del siglo pasado, como en otras áreas de España, se sustituyó definitivamente el sistema de explotación tradicional y "circular", con uso intensivo de mano de obra, por otro más extensivo u "horizontal" (Del Reguero, 1990). Se intentó frenar la erosión e incrementar la producción de madera mediante repoblaciones. Algunos de los efectos de éstas repoblaciones fueron negativos, sobre todo las que se llevaron a cabo en las áreas más degradadas. Se abrieron terrazas con buldozers, cortafuegos, pistas y vías de saca. Las técnicas utilizadas implicaron una elevación de las tasas de erosión a corto plazo, problemas hídricos, pérdidas de suelos fértiles, impactos paisajísticos, etc. (Ortigosa, 1991).

3.2. Sierra de la Demanda

La Sierra de la Demanda, situada entre las provincias de La Rioja y Burgos, cuenta con las cumbres más elevadas del Sistema Ibérico noroccidental (2000-2200 m) (Mapa 3.1 y Foto 3.5). Está compuesta por materiales paleozoicos, principalmente del Cámbrico, y en menor medida, del Ordovícico y Carbonífero (Colchen, 1974). En su sector más septentrional conserva una estrecha franja de la antigua cobertera mesozoica con conglomerados, arcillas y arenas del Trías junto a las calizas y margas del Jurásico. Estos mismos materiales han quedado protegidos en el sinclinal de Canales, en el interior de la Demanda.

El relieve, en líneas generales, presenta unos fuertes contrastes entre las líneas de cumbres y las vertientes. Las primeras nos ofrecen unas formas suaves, por encima de las cuales sólo destacan los picos más elevados. Tales divisorias corresponden a distintos niveles de erosión, a veces de difícil datación (Arnáez Vadillo y García-Ruiz, 1990). La suavidad de estos relieves sólo es alterada localmente por el modelado de circos glaciares en las cumbres más elevadas (García-Ruiz, 1979). Las laderas, por el contrario,

con elevados ángulos de inclinación, presentan una regularización que sólo es alterada por el afloramiento de algunos crestones rocosos muy aislados.

La dinámica geomorfológica actual y subactual está controlada por las condiciones climáticas que varían a medida que se asciende altitudinalmente (Arnáez Vadillo, 1987a). Por encima de los 1700-1800 m, en el nivel supraforestal, las bajas temperaturas y la nieve favorecen la existencia de un sistema morfoclimático crionival que se manifiesta por medio de canchales, terracetas, coladas de piedra y, en los ambientes más húmedos, con suelos profundos, por medio de lóbulos de solifluxión.

Por debajo de los 1700-1800 m, la evolución de las laderas se efectúa a través de una mayor variedad de procesos en función de factores litológicos, topográficos y de la cubierta vegetal. Así, por ejemplo, aparecen grandes desprendimientos controlados por factores lito-estructurales (Arnáez Vadillo, 1987 a y b), deslizamientos de menor tamaño ligados a las escorrentías subsuperficiales, arroyamiento superficial en áreas de cabecera, cárcavas, etc. (Arnáez Vadillo, 1989).

La posición occidental que ocupa la Sierra de la Demanda la hace beneficiaria de las influencias de los frentes atlánticos al constituirse en la primera barrera orográfica en nuestra región (Tabla 3.1). Las temperaturas son algo más suaves que en el resto de la alta montaña riojana (Valvanera, a 1000 m de altitud, registra una temperatura media anual de 9.8ºC mientras que en Ortigosa, en Camero Nuevo, es de 8.5ºC), lo que repercute directamente en la menor duración del manto nival (37.3 días en Pradoluengo, 24.6 en Pazuengos, y 19.4 en Ezcaray). Los procesos de fusión se detectan a partir del mes de marzo y no es inhabitual que en pleno invierno la entrada de los frentes oceánicos templados deje la Sierra desprovista de nieve.

Las precipitaciones recogidas en Pazuengos, a 1169 m, alcanzan los 840.3 mm y al oeste, en Pradoluengo, 802.2 mm (Ortega Villazán, 1993). En Valvanera se recogen 947.5 mm (Nuñez y Martínez, 1991), aunque es de esperar que en las cumbres se superen con facilidad los 1.500 mm al año (Arnáez Vadillo, 1987a). Parte de estas precipitaciones caen durante el invierno en forma de nieve, sobre todo por encima de los 1500-1600 m. La Demanda presenta dos estaciones lluviosas: invierno y primavera. En el verano se detecta una cierta sequía, si bien es en este macizo riojano donde se manifiesta de forma menos acusada.

Tabla 3.1. Características termopluviométricas de la Sierra de la Demanda

	VALVANERA		URDANTA	ALTUZARRA
	T (ºC)	P (mm)	P (mm)	P (mm)
Enero	2.8	97	94.4	108.9
Febrero	3.8	91.8	138.6	167.7
Marzo	5.8	73.2	80.7	118.9
Abril	6.9	122.8	139.3	178.5
Mayo	10.2	104	142.2	121.0
Junio	14.5	70.6	67.8	70.3
Julio	17.7	44.1	43.4	53.3
Agosto	17.8	39.4	54.7	58.8
Septiembre	15.8	38.7	44.6	41.4
Octubre	11.6	64.6	67.7	92.1
Noviembre	6.5	81.8	57.9	86.9
Diciembre	4.1	119.3	90.1	110.6
	9.8	947.5	1021,4	1208,3

Fuente: Instituto Nacional de Meteorología y Nuñez Olivera & Martínez Abaigar (1991).

La distribución de la vegetación y usos del suelo en la Sierra de la Demanda está controlada por las condiciones climáticas que imponen la altitud, la exposición, la litología y diversas acciones llevadas a cabo por el hombre en sus laderas. En los sectores más bajos y en las solanas a sotavento, la vegetación potencial está representada por la encina montana *(Quercus rotundifolia)*, que ocupa los ambientes más soleados y con suelos más pobres, y el quejigo *(Quercus faginea)*. A medida que se asciende aparece el robledal *(Quercus pyrenaica)*. Este forma los bosques más densos entre los 1100 y 1400 m. Por encima de esta última altitud, en laderas húmedas y umbrosas, se desarrollan los hayedos *(Fagus sylvatica)* que muy probablemente llegaron a alcanzar las líneas de cumbres, dejando al matorral solamente los picos más elevados y los crestones rocosos. La necesidad de nuevos espacios para pastos hizo descender el nivel superior del bosque *(timberline)* a los 1700-1800 m, siendo sustituido por una compleja comunidad de matorral *(Erica cinerea, Calluna vulgaris, Vaccinium myrtillus, Juniperus nana, Cytisus purgans,* etc).

3.3. Sierra de Cebollera y Camero Nuevo

El conjunto denominado Camero Nuevo abarca los cordones montañosos que enmarcan el río Iregua. De entre estos cordones destaca, en la cabecera del mismo río, la Sierra de Cebollera, que configura una alineación montañosa, en torno a los 2000-2100 m de altitud, con dirección prácticamente oeste-este (Mapa 3.1).

La Sierra de Cebollera, integrada en la gran cuenca subsidente secundaria de Cameros, está modelada sobre materiales del grupo Oncala (areniscas calcáreas) y en el sector central por los correspondientes al grupo Urbión, es decir conglomerados cuarcíticos que localmente forman destacados escarpes. Todos ellos pertenecen a la facies Purbeck-Weald.

En la Sierra de Cebollera el glaciarismo würmiense (Ortigosa, 1985 y 1986) ha dejado sus huellas en los sectores más elevados. Las nieves permanentes debieron situarse a partir de los 1800 m y dejaron formas vinculadas a la acción erosiva del hielo: circos, nichos de nivación y depósitos morrénicos de dimensiones superiores a los de la Sierra de la Demanda. Algunos complejos glaciares incluso llegaron a desarrollar lenguas. En concreto, Ortigosa (1986) señala al menos 11 glaciares con lengua; un buen número de ellos descendían hasta los 1550 m. También es posible localizar en estas sierras la actuación de los procesos periglaciares, principalmente canchales al pie de los escarpes rocosos (Sanz Pérez & Pellicer Corellano, 1994; Sanz Pérez, 2001).

La ubicación de Cebollera, más oriental y a sotavento de la Sierra de la Demanda, modifica las características climáticas del sector. De hecho se constata ya un descenso de las precipitaciones, en general, e invernales, en particular (Tabla 3.2). En Ortigosa (980 m), relativamente abierta a las influencias atlánticas, se recogen 636.5 mm, mientras que en otros enclaves más cerrados, como Aldeanueva y Lumbreras –más protegidos de los frentes-, las precipitaciones son bastante inferiores a pesar de estar localizados a mayor altitud: 622.9 mm, en la primera estación, y 547.1 mm, en la segunda.

Las temperaturas también descienden respecto a la Sierra de la Demanda (8.5º en Ortigosa, 9.4º en Aldeanueva y 9.2º en Lumbreras), por lo que el manto nival permanece prácticamente hasta finales de mayo y principios de junio. La media de días con nieve es superior a la de la Demanda. Ortega Villazán (1993) ha calculado 35 días entre los 1200-

1300 m y entre 45 y 50 días por encima de los 1500 m. Esto se debe a las bajas temperaturas de este sector, indicativa del matiz continental de la cabecera del Iregua (García-Ruiz & Martín-Ranz,1992).

Tabla 3.2. Características termopluviométricas de Camero Nuevo

	Ortigosa T (ºC)	Ortigosa P (mm)	Aldeanue. T (ºC)	Aldeanue. P (mm)	Lumbreras T (ºC)	Lumbreras P (mm)
Enero	2.1	52.8	1.9	44.0	0.9	41.8
Febrero	3.1	54.6	2.7	44.6	2.3	30.7
Marzo	4.5	48.0	6.1	47.0	5.9	37.5
Abril	5.8	82.7	7.3	60.8	7.1	44.5
Mayo	8.9	69.7	11.1	67.2	10.9	71.1
Junio	13.1	54.7	14.5	64.4	14.0	61.1
Julio	16.1	39.2	16.9	28.0	16.7	43.1
Agosto	16.2	42.7	17.6	30.4	17.5	32.3
Septiem.	14.0	30.3	15.0	45.5	14.7	46.6
Octubre	10.0	42.8	10.1	54.4	9.6	45.5
Noviem.	5.5	56.8	5.6	61.4	5.5	45.6
Diciem.	3.2	62.0	4.1	75.2	4.5	47.3
	8.5	636.5	9.4	622.9	9.2	547.1

Fuente: Instituto Nacional de Meteorología y Nuñez Olivera & Martínez Abaigar (1991).

La distribución de las especies vegetales obedece, como es lógico, a las modificaciones climáticas que introduce la altitud. Hasta los 1100-1200 m se desarrollan los bosques de quejigales *(Quercus faginea),* en substratos calizos, y rebollares *(Quercus pyrenaica)*, en suelos ácidos. Por encima de los 1200 m y hasta los 1600-1700 m, en el valle del Iregua, se encuentran importantes bosques de hayas *(Fagus sylvatica)* ocupando sobre todo los fondos de los barranco más húmedos. No obstante, el pino silvestre ha invadido buena parte del espacio natural del haya descendiendo hasta los 1200 m.

Las comunidades de sustitución de los bosques caducifolios sobre substrato ácido están representadas, en una primera fase, por los escobonales *(Genista florida)* acompañados por la retama *(Cytisus scoparius)* y el brezo *(Erica arborea)*. Con posterioridad, aparece una nueva fase de degradación en la que adquieren más importancia *Erica australis* y *Calluna vulgaris*.

A partir de los 1600 m, e incluso, como ya se ha dicho, a altitudes mucho menores, los hayedos son sustituidos por el pino silvestre. Entre los 1700 y los 1900 m el bosque de pino silvestre se aclara y da paso a enebrales rastreros *(Juniperus ssp. nana)*, brecina *(Calluna vulgaris)* y piornos que aguantan las condiciones extremas por encima de los 2000 m. Cabe destacar la masa de pino negro *(Pinus uncinata)* del Castillo de Vinuesa (Ruiz Flaño, 1989; Fernández Aldana et al., 1989). Los hoyos o circos a menudo escalonados, están ocupados por pastos de gramíneas entre las que destaca el cervuno *(Nardus stricta)*.

3.4. El conjunto montañoso oriental

Las montañas orientales de La Rioja están compuestas por un grupo de sierras de menor entidad (Mapa 3.1). Desde la Sierra de Cebollera las altitudes decrecen, de modo que ya nunca se alcanzan los 1800 m. La Sierra de Hayedo de Santiago representa el punto más elevado del sector, con 1761 m, mientras que la Sierra de Alcarama, más hacia el este, sólo logra los 1531 m.

Este conjunto montañoso se desarrolla en materiales mesozoicos de la facies Purbeck-Weald. Se trata de un conjunto sedimentario en el que predominan cuarzoarenitas, arcillas, areniscas y margas y calizas (Tischer, 1966) (Foto 3.6). El plegamiento alpino afectó al sector por medio de pliegues amplios con buzamientos suaves. El relieve se resuelve por medio de repetitivas cuestas, con frentes y reversos a lo largo y ancho de kilómetros. Las líneas de cumbres también son muy monótonas, con formas planas, lineas suaves y redondeadas.

Al norte afloran, por medio de una estrecha franja, los materiales triásicos (yesos, margas) y jurásicos (calizas), muy tectonizados con desarrollo de pliegues y fallas. El frente septentrional entra en contacto con la Depresión del Ebro por medio de una gran falla cabalgante.

La altitud, la exposición respecto a la circulación zonal y la compartimentación del relieve determinan los rasgos climáticos de la zona. Se registran temperaturas algo superiores a la Demanda y Cebollera (10º C) y las precipitaciones difícilmente alcanzan valores por encima de los 600-700 mm. Las precipitaciones en forma de nieve aparecen de noviembre a abril, con un número de días muy inferior a los ya indicados para las

sierras occidentales: 13.5 en Soto, 7.6 en Ocón, 3.4 en Enciso y 5.1 en Préjano. Los inviernos son fríos y el periodo de heladas prolongado. Los veranos son cálidos y las sequías profundas y de larga duración. La aridez estival es un rasgo característico de estas sierras. Ortigosa (1987) ha calculado que en Soto en Cameros se registra una sequía de 30 o más días en la estación estival cada 4.4 años y en el invierno cada 10.3 años. El máximo pluviométrico en las sierras orientales se alcanza en primavera, mientras que el otoño marca el máximo secundario. Este carácter equinoccial de las lluvias remarca el matiz mediterráneo, si bien la elevada oscilación térmica y la menor influencia de las lluvias otoñales denotan su posición interior.

Tabla 3.3. Características termopluviométricas del sector montañoso oriental

	Soto T (ºC)	Soto P (mm)	Enciso T (ºC)	Enciso P (mm)	Grávalos T (ºC)	Grávalos P (mm)
Enero	3.6	53	3.2	31	3.4	40
Febrero	4.7	44	4.2	23	4.4	33
Marzo	7.9	44	7.4	64	7.7	29
Abril	9.8	54	9.1	48	9.5	69
Mayo	13.3	70	12.7	48	13.0	97
Junio	17.0	64	16.3	52	16.7	72
Julio	19.6	30	18.9	29	19.3	62
Agosto	19.7	39	19.2	23	19.4	33
Septiem.	17.1	51	16.6	43	16.9	62
Octubre	12.2	52	11.6	36	11.9	27
Noviem.	7.3	60	6.9	40	7.1	33
Diciem.	5.1	72	4.8	30	5.0	39
	11.4	633	10.9	467	11.2	596

Fuente: Instituto Nacional de Meteorología

Estas condiciones climáticas han facilitado el desarrollo de rebollares *(Quercus pyrenaica)*, en suelos silíceos, y quejigos *(Quercus faginea)*, en calizos. En los sectores más elevados, aprovechando la humedad de las cabeceras de barranco, aparecen pequeños bosquetes de haya *(Fagus sylvatica)*.

La menor pendiente y la mayor amplitud de los valles orientales facilitaron el aprovechamiento agrícola. Hasta el 35% de la superficie de Camero Viejo se cultivó por medio de bancales y campos en pendiente. Más tarde, éstos fueron totalmente abandonados (Lasanta et al. 1989). La despoblación del territorio, que comienza a finales

del XIX y alcanza su máxima expresión a mediados del XX, dio paso a una etapa en la que una parte importante del territorio quedó a merced de la erosión o de procesos naturales de recolonización vegetal.

El abandono de los bancales ha tenido algunos efectos negativos desde el punto de vista de la conservación del suelo y del paisaje. De hecho en las laderas abancaladas se detectan dos procesos de erosión muy repetidos: los desprendimientos, que aparecen en el salto del bancal (Ortigosa et al., 1994), y el arroyamiento difuso que se concentra en las fajas llanas (Lasanta et al., 2001).

Lo habitual, no obstante, es observar procesos de recolonización y sucesión vegetal protagonizados por los matorrales mediterráneos (Arizaleta et al. 1990). Las distintas estrategias de invasión de los campos abandonados por la vegetación natural así como una descripción de las especies fundamentales han sido descritas por García Ruiz et al. (1985) y Sobrón & Ortiz (1989). En substratos calizos, con suelos pedregosos, se han desarrollado comunidades leñosas de romerales *(Rosmarinus officinalis),* espliegares *(Lavandula latifolia),* tomillares *(Thymus vulgaris)* y aliagares *(Genista scorpius).* Sobre substratos silíceos el matorral dominante, casi monoespecífico, es la jara *(Cistus laurifolius),* que en algunos casos también puede ir acompañada de tomillares *(Thymus vulgaris),* aliagares *(Genista scorpius*) y rosáceas *(Crataegus monogyna, Prunus spinosa, Rosa, sp.).* Por encima de los 1200 m de altitud el jaral integra en su interior especies de carácter húmedo como enebros, brezos y retamas. Junto al matorral el bosque también se ha visto favorecido por el abandono del espacio serrano. La menor presión, sobre los robledales y hayedos, ha permitido el incremento de su superficie.

El matorral mediterráneo, a menudo abierto, es poco eficaz en la protección del suelo. Las tormentas veraniegas y las lluvias irregulares y de gran intensidad encuentran aquí un suelo débil, desnudo, poco profundo, litologías deleznables y pendientes importantes que facilitan el arroyamiento superficial. Todo ello ha impedido en ocasiones que, las repoblaciones de coníferas, adaptadas a ambientes secos, frenaran la erosión en los valles del Jubera, Cidacos y Alhama. Un papel a veces más relevante desempeñan las comunidades de matorrales con importantes porcentajes de cubrimiento como los estrepales y aulagares.



Foto 3.5. Macizo paleozoico de La Demanda con predominio de materiales cámbricos.



Foto 3.6. Vista del Camero Viejo. Materiales de fase Purbeck-Weald entre los valles Leza y Jubera. Aldea de Antoñanzas.

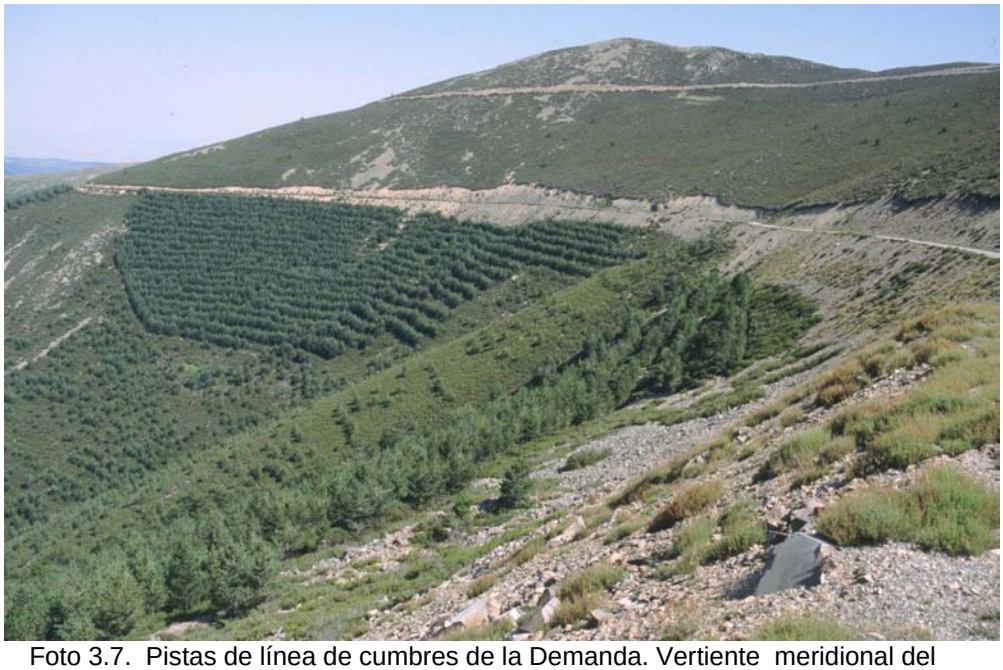


Foto 3.7. Pistas de línea de cumbres de la Demanda. Vertiente meridional del San Lorenzo 1900 m de altitud.



Foto 3.8. Pista de ladera inferior en Cornago para la construcción de una presa.

3.5. Las pistas forestales en la montaña riojana

Los datos sobre pistas forestales han sido muy escasos y poco fiables. La información se ha considerado, hasta hace muy poco tiempo, confidencial con el fin de evitar el uso indebido de estas vías de acceso a las áreas de montaña. Los incendios forestales, el temor a la caza o pesca furtivas, la alteración de ecosistemas con especies en peligro de extinción, etc. han desanimado a las autoridades medioambientales a aportar referencias sobre pistas forestales.

Según un inventario realizado en 1979 en los montes a cargo del ICONA -de dudosa exactitud según fuentes consultadas-, en el territorio riojano se habían construido 710 kilómetros de pistas forestales. Representaban aproximadamente el 2% de la red nacional y suponían una densidad media de 4 metros por hectárea de terreno forestal (media nacional: 4 a 4.5 metros por hectárea). Algunas de las características de esta red, y para la fecha indicada, aparecen reseñadas en las tablas 3.4 y 3.5, donde se ha incluido, por un lado, la clase de firme y, por otro, la anchura de las pistas, comparando los valores relativos con los del resto del país.

Tabla 3.4. Clases de firme en las pistas forestales riojanas.

	1	2	3	4	5	6
La Rioja (km)	24	33	22	36	92	503
La Rioja (%)	3.3	4.6	3.1	5.0	13	70.8
España (%)	1.5	3.6	0.1	11.9	11.6	71.3

1) Aglomerado asfáltico, 2) Bituminoso, 3) Suelo de cemento, 4) Macadán, 5) Tierra estabilizada, 6) Terreno natural

Tabla 3.5. Anchura de las pistas forestales riojanas.

	< 3 m	3-4 m	4-5 m	5-6 m	> 6 m
La Rioja (km)	-	92	396	184	38
La Rioja (%)	-	12.9	55.8	25.9	5.4
España (%)	1.7	20.6	51.1	19.6	7

En el año 1986 se inició la elaboración de un inventario elemental de pistas. De éste se desprende que en la Comunidad había 825 kilómetros de pistas correspondientes a 163

tramos. A éstos habría que sumar aproximadamente otros 135 tramos sin catalogar y que podrían suponer no menos de 600 kilómetros. En total La Rioja en el año 1990 dispondría de aproximadamente 1500 kilómetros de pistas (8.6 metros por hectárea), cifra considerada por Elorrieta (2001) como adecuada para efectuar trabajos de repoblación forestal.

En nuestros días la disponibilidad de nuevos instrumentos de análisis territorial (fotografía aérea de precisión, imágenes de satélite, cartografía digitalizada o sistemas de información geográfica) facilitan la catalogación e inventario de las redes de pistas forestales. No obstante, sigue siendo difícil trabajar con objetos lineales que exigen altas resoluciones (Oliveira, 2002). Para el estudio de la distribución de pistas en el ámbito regional son necesarias resoluciones de 4 ó 5 m. Gil-Docampo et al. (2003) han logrado caracterizar satisfactoriamente vías rurales a partir del análisis visual de las imágenes de Landsat TM y Spot P corregidas y realzadas. A partir de la composición coloreada de Landsat 2/3/4 y su fusión con Spot se identifican las vías, mientras que el tipo de firme se averigua mediante Landsat 7/2/4. Armesto & Gil (2001) han utilizado imágenes pancromáticas de 5.8 m en los Ancares para extraer las vías de comunicación con un coste y tiempo muy competitivos. Para la determinación de características morfotopográficas de los sectores de las pistas son necesarias ya resoluciones más altas (1, 0.7 y 0.5 m).

Para dibujar con precisión la red de pistas forestales en nuestra área de estudio hubiese sido conveniente utilizar la fotointerpretación o apoyarnos en imágenes de satélite. Sin embargo, este proceso habría resultado excesivamente costoso en tiempo para cumplir el objetivo de introducir algunos datos actualizados de la red de pistas riojanas. Por ello se ha accedido a esta información a través del material aportado por la Consejería de Turismo, Medio Ambiente y Política Territorial (Gobierno de La Rioja). En concreto, se nos cedió la cartografía digital de pistas que fue superpuesta a un MDT de 10 metros de resolución. La capa de pistas forestales de la Comunidad se ha elaborado a partir de la cartografía digital 1:25.000 del Instituto Geográfico Nacional.

Dada la dificultad de aunar criterios sobre la definición del término pista forestal o de montaña, así como de implementar una metodología y técnicas complejas para el estudio de su distribución en un espacio tan amplio, para este apartado se estableció una sencilla definición: toda vía transitable con un vehículo situada por encima de los 800 metros de

altitud. Este valor, en el caso de La Rioja, separa la zona de montaña, situada al sur de la Comunidad, de la correspondiente al valle o depresión, que se localiza en el norte. La superficie incluida representa el 48.5% del total riojano. Este criterio, al no incorporar la pendiente -variable que complicaría excesivamente la delimitación- permite añadir las pistas que circulan por los fondos de valle del espacio serrano.

De este modo, el mapa de las áreas de montaña por municipios de Fernández Aldana (1985) coincide, en términos generales, con nuestro mapa de densidad de pistas, si bien el nuestro es algo más extenso, al incluir algún otro municipio. En resumen, el área de estudio obtenida engloba los municipios de la zona de montaña, los de piedemonte y los del área especial de la cuenca del Alhama de características mixtas de transición.

No ha sido posible delimitar los diferentes tipos de pistas. En el material aportado por el Servicio Cartográfico de la Comunidad se incluyen sin diferenciar pistas principales, secundarias, cortafuegos transitables con vehículos especiales y vías terciarias o trochas transitables sólo con vehículos 4x4. También se dispone de una base de datos con diferentes niveles de transitabilidad y accesibilidad. Con el primer criterio se seleccionan pistas según el diferente tipo de vehículo que puede circular por ellas (automóvil, todo terreno, camión de pequeño y gran tonelaje, vehículos especiales) y según la pericia del conductor (sin o con especialización o profesionalidad). En cuanto a la accesibilidad, se considera el paso libre o el grado de restricción (restricción a la circulación en vehículo, restricción a la circulación de personas de manera temporal o permanente, etc.).

El siguiente apartado aporta información sobre la distribución y características básicas de la red de pistas de la montaña riojana obtenida a partir de un sistema de información geográfica.

3.5.1. Caracteres generales de la red de pistas forestales de la montaña riojana

La red de pistas forestales en la montaña riojana recorre aproximadamente 3648 Kilómetros en un espacio de 2451.6 Km^2, el 48.5% del territorio de La Rioja. Estos valores dan como resultado una densidad para el área de estudio de 14.8 metros por hectárea, cifra muy superior a la recomendada para trabajos de reforestación y una prueba más de la actual proliferación de pistas en las áreas de montaña.

En el mapa 3.3 se representan las densidades de carreteras y pistas por municipios. En una primera aproximación se puede afirmar que la mayor densidad de pistas forestales en el Sistema Ibérico riojano se encuentra en el sector septentrional de la Sierra de la Demanda, donde se sobrepasan los 20 m/Ha en un buen número de municipios: Pazuengos (20.9 m/Ha), Ojacastro (25.9 m/Ha), Villarejo (24.2 m/Ha), Valgañón (23.5 m/Ha), San Millán (20.6 m/Ha), Manzanares de Rioja (20.7 m/Ha) y Tobía (17.2 m/Ha).

Un segundo núcleo de concentración de pistas se detecta en las sierras del Serradero y Moncalvillo, con densidades por encima de los 12 m/Ha. En Castroviejo se han calculado 19.6 m/Ha, en Pedroso 17 m/Ha, y en Ledesma de la Cogolla 17.4 m/Ha. El máximo regional se encuentra en esta zona, concretamente en el municipio de Santa Coloma con 26 m/Ha. En los municipios del alto Iregua (Ortigosa, El Rasillo o Villoslada), con importantes recursos forestales, también las densidades alcanzan los 12 m/Ha.

El tercer núcleo con alta densidad de pistas se localiza en el alto Cidacos (Sierra de Hayedo de Santiago), donde se superan los 12 y 16 m/Ha. (Munilla, 17.5, Ajamil, 16.3, y Enciso, 14.7).

En conjunto, las densidades se mantienen en la mayor parte del territorio por encima de los 8 m/Ha, descendiendo esta cifra en el piedemonte, o en los valles del Leza-Jubera o Cidacos y en las sierras de Yerga o Alcarama. En las estribaciones meridionales de la Sierra de Cantabria, desde Pancorbo hasta Briñas, la densidad de pistas es mucho menor, lo que está en consonancia con la escasez de masas forestales de cierta entidad.

Las pistas forestales riojanas obedecen a la necesidad de acceder a zonas o áreas con recursos forestales que gestionar o proteger. Principalmente se relacionan con la localización de bosques maderables en explotación, puestos de vigilancia contra incendios y repoblaciones forestales. Secundariamente, se abren pistas en áreas de explotación ganadera, cuando es necesario conectar aldeas o acceder a lugares donde se han instalado diversas infraestructuras (presas, repetidores, helipuertos, parques eólicos, etc.) En los años sesenta y setenta se realizaron sistemáticas prospecciones petrolíferas en Camero Viejo que necesitaron vías de acceso. Su construcción, junto a los cortafuegos, supone un importante impacto paisajístico y geomorfológico.

Un aspecto importante a comentar de la red de pistas riojanas es la posición que ocupan en las laderas. Mientras que en la Demanda abundan las pistas en las líneas de

cumbres, por encima de los 2000 m de altitud (Foto 3.7), no ocurre lo mismo en Cebollera, donde los ascensos a las cumbres se hacen a través de trochas, o en Urbión, donde su número es muy limitado. En Camero Viejo, Hayedo de Santiago y Sierra la Hez también se encuentran pistas que enlazan los fondos de valle con las líneas de cumbres.

Las pistas con recorridos por los fondos de valle son muy abundantes y se localizan en todos los sectores montañosos. Permiten penetrar en el interior de los cursos fluviales secundarios a partir de las carreteras regionales (Foto 3.8). Se puede destacar por su desarrollo longitudinal las pistas de Villavelayo a Neila, la del río Ciloria en Valgañón, la del río Roñas y arroyo de Canto Grande en Anguiano, la del alto Cárdenas en San Millán, las de los arroyos Lavieja y Lavatier en Lumbreras, la del río Rabanera en Ajamil, la de la ermita de Sta. Apolonia por el arroyo de Monte Mayor en Laguna, etc.

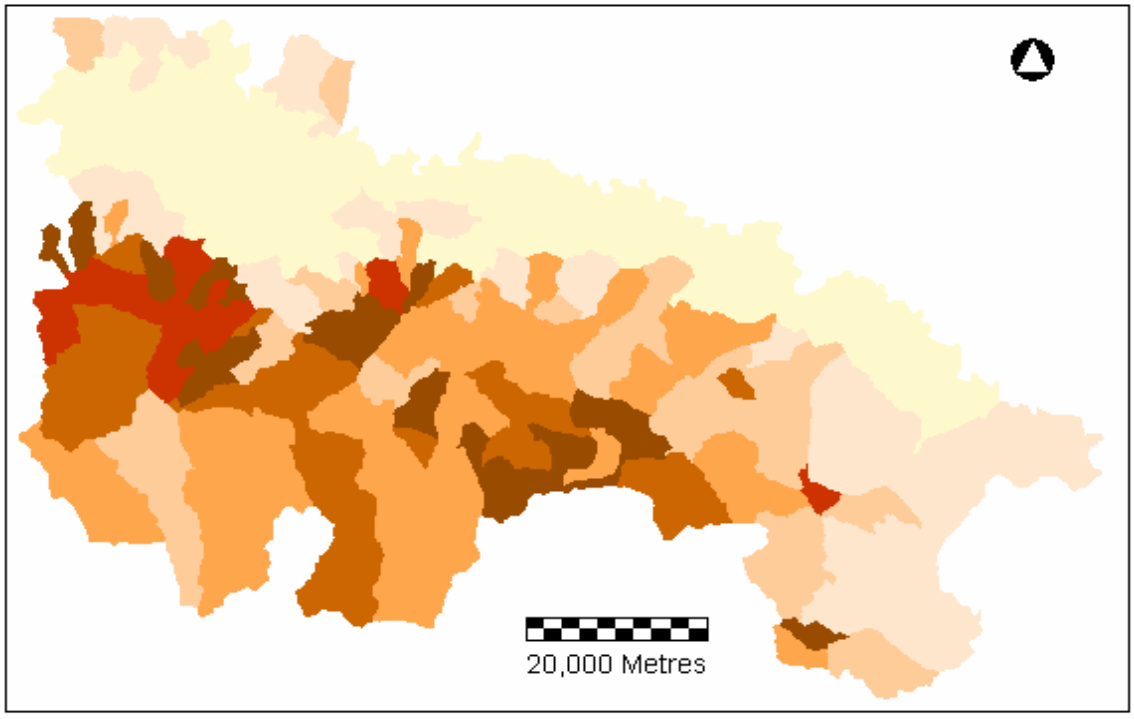
Pistas con largos desarrollos por laderas intermedias (Foto 3.9) son las del alto Oja en Ezcaray por debajo del Hombre, la de Cerro Ibaya en Valgañón, las de Hoyos de Iregua en Puente Ra; los ascensos a Moncalvillo, las pistas de Sierra la Hez, Yerga, Gatún, Peña Isasa o Alcarama, en las sierras más orientales.

Finalmente, también se dispone de tramos de pistas en zigzag que en muy poca distancia y salvando un fuerte desnivel conectan los fondos de valle con las líneas de cumbres. Estos tramos de fuerte impacto visual están sometidos a importantes procesos de erosión. Destacan los correspondientes al ascenso a la Cruz de la Demanda, a San Millán, al Portillo Nestaza, a Peña Hincada, a Santa Marina o al barranco Cobarajas, en Villavelayo (Foto 3.10).

Las conexiones entre los distintos valles de la montaña son posibles a través de las pistas forestales situadas a distinta altitud. Dado el interés de estas conexiones algunos tramos se han construido o asfaltado en los últimos años.

La observación del mapa de pistas forestales (mapa 3.4) permite conocer no sólo las áreas de mayor o menor concentración de pistas, sino también el diseño de su trazado. En las sierras de borde de cuenca (Moncalvillo o Cabimonteros) la red presenta una disposición casi “dendrítica” favorecida por la presencia de numerosos núcleos de población y la topografía. Aquí, las bajas pendientes facilitan en las pistas nuevas ascensos transversales a los valles e incluso directos por las divisorias. En los interfluvios Najerilla-Iregua e Iregua-Leza las pistas crean una irregular “espina de pez” con ascensos

Mapa 3.3. Mapa de densidades de pistas por municipios en las áreas de montaña riojanas.



Datos de la Sección de Sistemas de Información Geográfica y Cartografía
Dirección General de Política Territorial
Consejería de Turismo, Medio Ambiente y Política Territorial

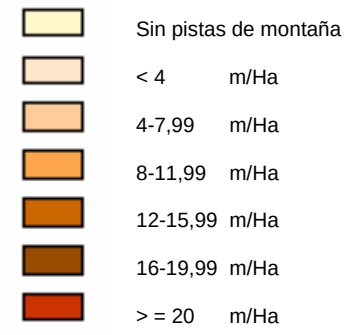




Foto 3.9. Pista principal y tramos secundarios. Trazado dendrítico alrededor de Cabimonteros. Ocón-Arnedillo (P7).



Foto 3.10. Antigua pista, hoy paso asfaltado con trazado en zig-zag entre Ortigosa y Brieva de Cameros.

Mapa 3.4. Mapa de distribución de pistas de montaña en La Rioja. Elaborado a partir de la información facilitada por la Sección de Sistemas de Información Geográfica y Cartografía. Gobierno de La Rioja.

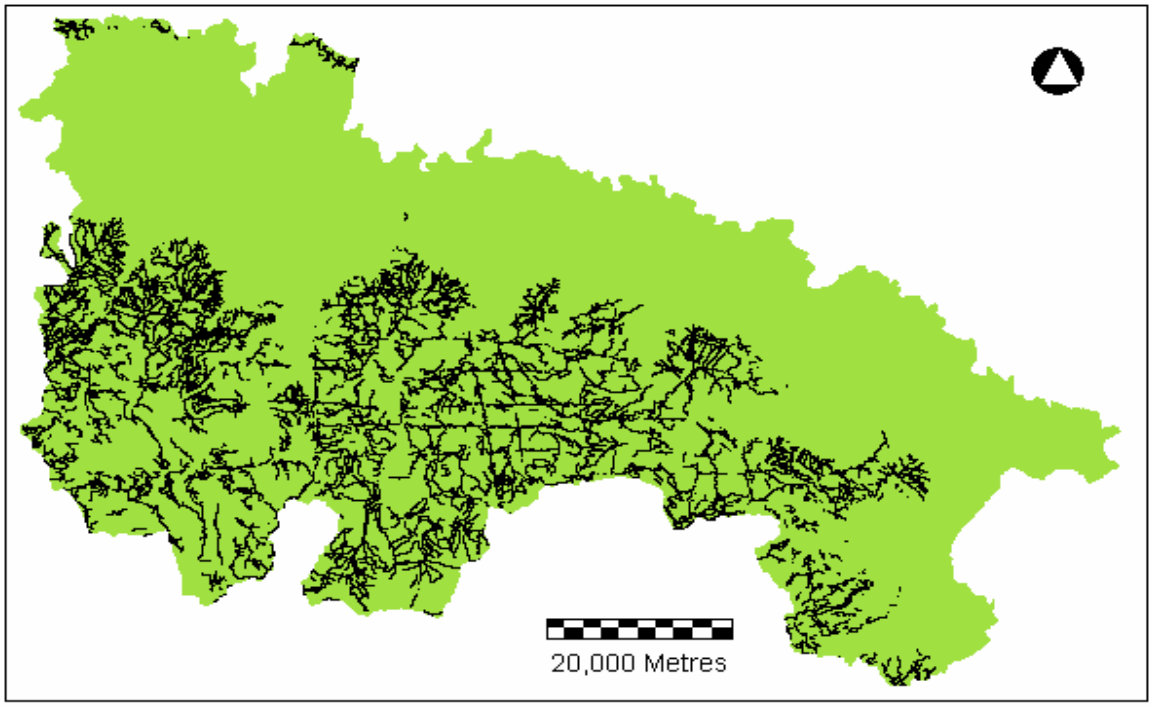




Foto 3.11. Pista de línea de cumbres y de cabecera del valle del Jubera. Interfluvio Leza-Jubera.



Foto 3.12. Tramo de ascenso a la línea de cumbres anterior desde Munilla.

desde las poblaciones de los fondos de valles hasta las líneas de cumbres. El escaso poblamiento del valle del Jubera y las repoblaciones forestales a gran escala han facilitado la configuración una red "circular". En el extenso municipio de Ezcaray, en exposiciones umbrías y a barlovento, destaca la gran densidad de pistas que contrasta con el escaso desarrollo de éstas en la solanas del alto Najerilla y en Urbión. Por último, se observa en el mapa trazados "reticulares" en los Cameros, donde las prospecciones de petróleo de los años setenta dieron origen a multitud de trochas y pistas que, en gran medida, han sido reconstruidas.

3.5.2. Distribución de pistas forestales según variables geoecológicas

La distribución de pistas forestales según variables geoecológicas ha podido obtenerse a partir de la combinación en un sistema de información geográfica de la capa de pistas forestales proporcionada por la Dirección General de Política Territorial del Gobierno de La Rioja (Consejería de Medio Ambiente, Turismo y Política Territorial) y los mapas digitales disponibles (MDT y mapa de usos del suelo).

En la tabla 3.6 se ha indicado los kilómetros de pistas forestales según diferentes franjas altitudinales. Como puede observarse, casi el 83% de las pistas se localizan por debajo de los 1400 metros y un 50% por debajo de los 1100. Por encima de los 1700 metros sólo discurren el 3.7% del kilometraje de las pistas forestales. Los tramos por encima de los 2000 metros recorren principalmente las líneas de cumbres de la Sierra de la Demanda y pequeños tramos de la Sierra de Cebollera.

Tabla 3.6. Distribución de pistas forestales y vías de acceso según la altitud

Altitud (m)	800-1100	1100-1400	1400-1700	1700-2000	>2000
Km. pista	1790	1230	487	137	4
	49.1%	33.7%	13.3%	3.7%	0.1%

Respecto a la pendiente de las laderas en las que se insertan las pistas, predominan los trazados que discurren por laderas de menos de un 25% (Tabla 3.7). Estas laderas suelen mostrarse estables desde una perspectiva hidrogeomorfológica. Más sensibles son las pistas que circulan por laderas de 25% al 50% de inclinación y que en nuestro caso representan el 38.3% de los trazados. Entre el 50% y 75% de pendiente sólo se han cartografiado 161 kilómetros de pista (4.4%). Es común que en laderas con estas pendientes se desencadenen movimientos en masa de diferente tamaño y velocidad en virtud del grado de saturación de los suelos, la intensidad y persistencia de las precipitaciones en momentos críticos u otros factores. En pendientes superiores al 75% se encuentran tan sólo un 0.25% de pistas, en los que se ha observado una fuerte actividad erosiva.

Tabla 3.7. Distribución de pistas forestales y vías de acceso según la pendiente

Pendiente %	**<25**	**25-50**	**50-75**	**75-100**	**100-125**	**>125**
Km. Pista	2079.5	1397.9	161.4	8.0	0.9	0.6
	56.9%	38.3%	4.4%	0.2%	0.03%	0.02%

En la tabla 3.8 se observa una distribución bastante equilibrada de las pistas con relación a la exposición, con un ligero predominio del kilometraje orientado al norte (29.41%) y este (25.9%) debido a la propia disposición del Sistema Ibérico. Un 2.9% de los trayectos dispone de exposiciones indiferentes (horizontales) al desarrollarse en líneas de cumbres o fondos de valle.

Tabla 3.8. Distribución de pistas forestales y vías de acceso según la exposición

	Norte	**Sur**	**Este**	**Oeste**	**Indiferente**
Km. Pista	1073	731.4	944.6	793.2	106.4
	29.4%	20.04%	25.9%	21.7%	2.9%

La distribución de pistas según los tipos de vegetación ha sido recogida en la tabla 3.9. Una gran parte de los trayectos recorre bosques caducifolios (23%) y bosques de

coníferas (15.2%). La abundancia de recorridos por masas forestales pone en evidencia la importancia de estos cubrimientos en las sierras riojanas. No obstante, es más significativo el alto porcentaje de kilómetros de pistas que circula por matorrales (41%). También un importante porcentaje discurre por campos cultivados o abandonados (campos en pendiente, bancales) y terrenos todavía agrícolas, a menudo dedicados a frutales u olivares.

Tabla 3.9. Distribución de pistas forestales y vías de acceso según la vegetación

	1	2	3	4	5	6
Km. pistas	557.9	840.5	148.6	1497,2	48.6	555.6
	15.2%	23.0%	4.07%	41.05%	1.3%	15.2%

1. Bosque de coníferas; 2. Bosque de caducifolios; 3. Carrascas; 4. Matorral; 5. Prados; 6. Otros

Finalmente, se han considerado otros dos factores en la organización espacial de las pistas forestales de la montaña riojana: los kilómetros que interceptan ríos principales, y la distancia de las pistas a los mismos. Para este último caso han sido utilizados los siguientes intervalos: menos de 30 metros, de 30 a 60 metros, de 60 a 120 metros, de 120 a 180 metros y más de 180 metros (Tabla 3.10). La bibliografía consultada concluye que un alto número de intersecciones o una excesiva proximidad pista-red fluvial constituyen factores que elevan el impacto ecológico y geomorfológico de las pistas.

Atendiendo a la tabla 3.10, se puede observar que aproximadamente un 5% de los kilómetros de las pistas forestales se encuentran a menos de 60 metros de la red fluvial principal pudiéndose ver afectada por problemas de saturación de suelos, desbordamientos, hundimientos o deslizamientos esporádicos. Casi el 90% de las pistas analizadas discurre a una distancia superior a los 180 metros de la red fluvial principal; no obstante, tienen que sortear ríos de segundo orden, arroyos y barrancos que exigen la construcción de pasos subterráneos, cunetas de derivación, etc.

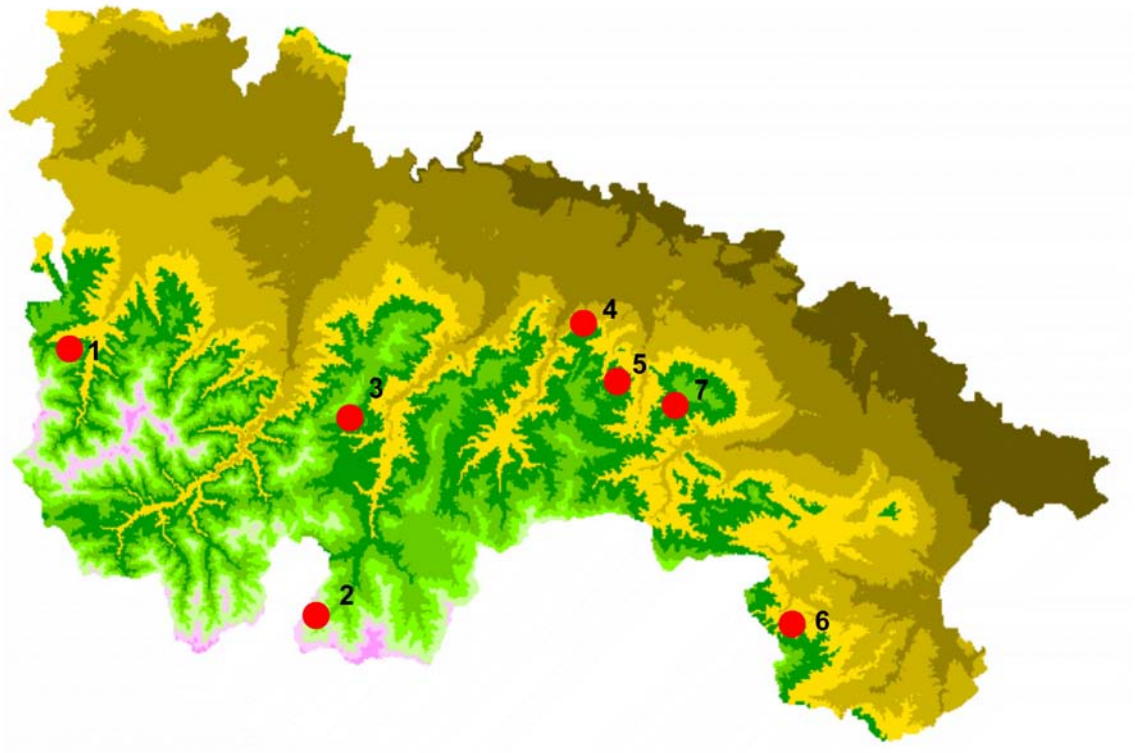
Tabla 3.10. Distribución de pistas forestales y vías de acceso según la distancia a los ríos

	Intersección	<30 m	30-60 m	60-120 m	120-180 m	>180 m
Km. Pista	15.8	94.7	83	105.9	89.8	3259.3
	0.4%	2.6%	2.2%	2.9%	2.4%	89.3%

CARACTERÍSTICAS DE LAS PISTAS SELECCIONADAS

En este apartado se define el marco medioambiental por donde discurren las pistas forestales seleccionadas y algunas de sus características generales.

En conjunto se ha trabajado en siete pistas forestales representativas de las diferentes unidades del Sistema Ibérico riojano (Mapa 4.1). En la tabla 4.1 se señalan algunos datos de interés.



Mapa 4.1. Localización de las pistas seleccionadas para el estudio

1) Pista Valgañón-Ezcaray; 2) Pista Hoyos de Iregua; 3) Pista Nieva-Gamellones; 4) Pista Zenzano; 5) Pista Sta. Marina; 6) Pista Cornago-Alcarama; 7) Pista Ocón-Arnedillo

Tabla 4.1. Cuadro-resumen de algunas características generales de las pistas estudiadas

Pista	Unidad	Litología	TºC	Pmm	Altitud estación (m)	Lon. (Km)	Año constr.
P1	S. Demanda	Pizarras	9.8	947	1020	17	Antes 1977
P2	S. Cebollera	Cuarzoarenitas	9.1	565	1184	14.7	1973-80
P3	Camero Nuevo	Calizas	8.5	636	980	5.4	1978-89
P4	Camero Viejo	Yesos/calizas	11.4	606	717	14.5	1972-88
P5	Camero Viejo	Cuarzoarenitas	10.5	436	905	11.1	1987-88
P6	S. Alcarama	Arcillas	12.7	440	757	12.6	1980-84
P7	Cabimonteros	Conglomerados	10.5	436	905	18.4	1987-88

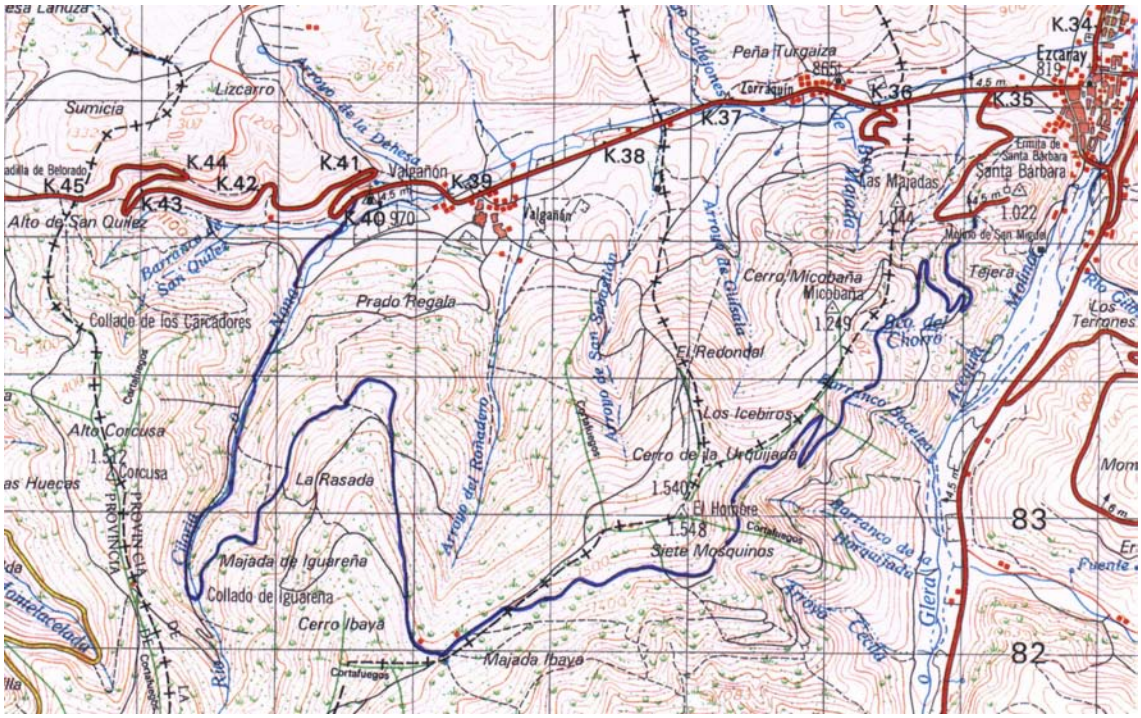
P1 (Valgañón-Ezcaray); P2 (Hoyos de Iregua); P3 (Nieva-Gamellones); P4 (Zenzano); P5 (Sta. Marina); P6 (Cornago-S. Alcarama); P7 (Ocón-Arnedillo).

4.1. Descripción general

4.1.1. Pista forestal Valgañón-Ezcaray (P1)

En el sector septentrional de la Sierra de la Demanda ha sido seleccionada la pista Valgañón-Ezcaray (P1) (Fig. 4.2). Comienza su recorrido en la ermita de las Tres Fuentes (970 m), en el término de Valgañón, y asciende siguiendo el curso del río Ciloria hasta la base del cerro Ibaya (1520 m). Desde allí un ramal asciende hacia la cabecera del río Menárez y a la línea de cumbres en la divisoria con la provincia de Burgos. Desciende por las vertientes de la margen izquierda del Oja alcanzando la ermita de Santa Bárbara (1000 m) (Foto 4.1).

La longitud total de la pista es de 17 Km salvando un desnivel de 718 m, aunque incluyendo el ramal del barranco Menárez (al sur de cerro Ibaya), sumaría 23 Km (1690 m de altitud máxima). Su construcción se remonta probablemente a finales de la década de los 60, si bien ha sufrido posteriores remodelaciones en sus distintos tramos. El firme es de grava en los primeros kilómetros y de terreno natural estabilizado en el resto. En la campaña de verano del 2002 se observó un repaso casi generalizado de los taludes y cunetas en buena parte de la pista, así como la marcación y construcción de drenajes en diversos puntos.



Mapa 4.2 Recorrido de la pista Valgañón-Ezcaray (P1) sobre el mapa del Servicio Geográfico del Ejército E. 1:50.000 Hoja de Ezcaray.

Los materiales por los que discurre la pista son fundamentalmente paleozoicos, aunque en el comienzo del trazado afloran materiales cuaternarios y sobre todo triásicos, que aparecen de nuevo al final del recorrido. Concretamente, hay sectores donde predominan las arcillas rojas del Keuper y las areniscas y arcillas del Bundsandstein. Pero, sobre todo, son las pizarras del Cámbrico medio y las cuarcitas del Cámbrico inferior los tipos de roca predominantes. Esta litología aparece enmascarada por un manto de derrubios que, en las áreas más elevadas, regulariza las laderas. Con un espesor de más de 2 m en los lugares más favorables, presenta una importante proporción de clastos envueltos en una matriz arenosa que, al no rellenar completamente el derrubio, permite una fácil circulación de las escorrentías subsuperficiales (Arnáez Vadillo, 1987a).

El contacto entre distintas litologías, que en muchos casos es claramente tectónico, condiciona la aparición de movimientos en masa en las proximidades de la pista. Así, la ladera del barranco Menárez muestra desprendimientos de dimensiones considerables, acompañados de otros de menor tamaño. Estos desprendimientos están vinculados a la saturación del manto de derrubios y, en algunos casos, de las arcillas rojas del Keuper, que en situaciones de gran pendiente y/o elevada humedad,

llegan a alcanzar los límites de plasticidad. Los suelos del sector son tierras pardas sobre pizarras paleozoicas que han dado lugar a la repetición de un tipo de perfil en los taludes de la pista en los que se aprecia un horizonte superior fijado por las raíces del manto vegetal y un horizonte B en evolución. El horizonte A, de unos 20 cms de espesor, tiene generalmente humus tipo mull y una riqueza en materia orgánica del 3-5%. El horizonte B dispone de una textura arenosolimosa o limoarenosa, con una estructura poco o nada compacta de tipo granular o poliédrica subangular. El drenaje es bueno gracias a la topografía y a la textura del suelo. Su pH es siempre superior a seis (VV.AA., 1970).

La pista transcurre por el piso supramediterráneo subhúmedo/húmedo, con precipitaciones entre los 800 y 1000 mm. La humedad ambiental posibilitó el que las vertientes estuvieran originariamente tapizadas por hayedos *(Fagus sylvatica)* y robledales *(Quercus pyrenaica)*. Sin embargo, en la actualidad, estos bosques han quedado muy reducidos por la actividad antrópica. Las laderas aparecen cubiertas por repoblaciones de pinos y un denso matorral de brezos *(Erica arborea)*, escobonales *(Genista florida)* y retamares *(Cytisus scoparius)*. Una parte del recorrido de la pista se efectúa a través de un denso y maduro bosque de hayas (arroyo del Roñadero, cabecera del Menárez) y otro de pino silvestre de repoblación.

La pista cumple distintos fines. Principalmente, facilita la conservación, gestión y explotación de las repoblaciones forestales del área. También es utilizada por una ganadería extensiva centrada en las aldeas del valle del Ciloria y Oja (Valgañón, Ezcaray y Zorraquín). Por último, sirve como vía de acceso a parajes de interés turístico, varios refugios y un área recreativa (Prado Iguareña).

4.1.2. Pistas de Hoyos de Iregua (P2)

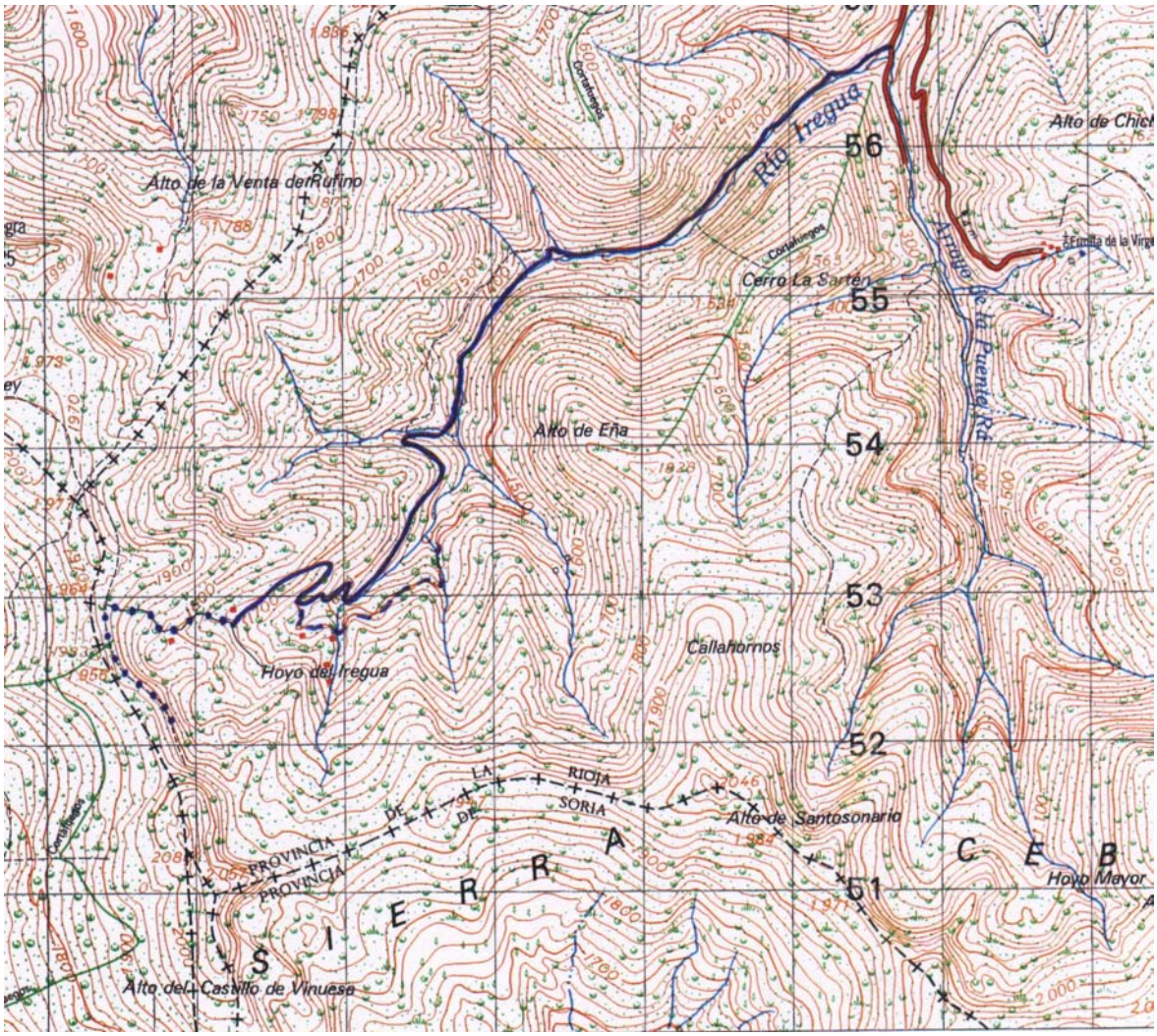
En la Sierra de Cebollera se ha seleccionado la pista forestal de Hoyos de Iregua (P2) (Mapa 4.3 y Foto 4.2). Parte del paraje denominado La Blanca (1200 m) y asciende a lo largo del río Iregua hasta las inmediaciones de los circos de Hoyos del Iregua. El estudio de la pista se ha efectuado en tres tramos. El primero es de grava y asciende desde La Blanca hasta los 1640 m por la margen izquierda del río; el segundo, con un firme de terreno natural estabilizado, alcanza los 1835 m, en las proximidades de un refugio de cazadores. El tercer sector, con un firme de terreno natural sin estabilizar, es un ramal que discurre por la margen derecha del río, se acerca a un refugio y prosigue su camino hasta conectar con el arroyo de Puente Ra.



Foto 4.1. Tramo en ladera media de fuertes pendientes. Pista Valgañón-Ezcaray (P1)



Foto 4.2 Troncos apilados en un tramo en vaguada de la pista Hoyos de Iregua (P2).



Mapa 4.3 Recorrido de la pista Hoyos de Iregua (P2) sobre el mapa del Servicio Geográfico del Ejército E. 1:50.000. Hoja de Villoslada

La pista discurre en su mayor parte por materiales jurásicos de areniscas cuarcíticas alternando con limolitas arenoso-arcillosas e intercalaciones conglomeráticas hasta los 1590 m. A partir de aquí dominan las areniscas y conglomerados con alguna intercalación arcillosa. Los conglomerados son heterométricos y poligénicos. La tectónica juega un papel importante en algunos tramos, concretamente una gran falla de dirección NO-SE que se desdobla en un cabalgamiento de dirección ONO-ESE en torno a los 1480 m.

Algunas de las laderas recorridas por la pista están tapizadas por canchales cuaternarios que se componen de bloques y cantos de tamaño variado y con escasa o

nula matriz. En la zona más alta aparecen depósitos morrénicos formados por conglomerados con bloques de hasta 3 y 4 m con matriz arenoso arcillosa muy heterogénea.

La pista en su recorrido atraviesa distintos pisos bioclimáticos. En el sector inferior el pino silvestre muestra su capacidad invasora descendiendo hasta los 1200 m. Se observa también un bosque mixto de frondosas con hayedos *(Fagus sylvatica),* en umbrías y fondos de barranco, y robledales *(Quercus pyrenaica, Quercus petraea),* en solanas y pies de vertiente. En las áreas más elevadas aparecen brezales *(Erica aragonensis, E. vagans, E. cinerea)*, piornales *(Citysus purgans)*, acompañados de *Calluna* y enebro *(Juniperus nana)*, y prados de montaña.

Los suelos más abundantes son los pardo forestales que se diferencian de los de la Demanda por su mayor acidez, mayor abundancia de arenas y carácter más oligotrófico.

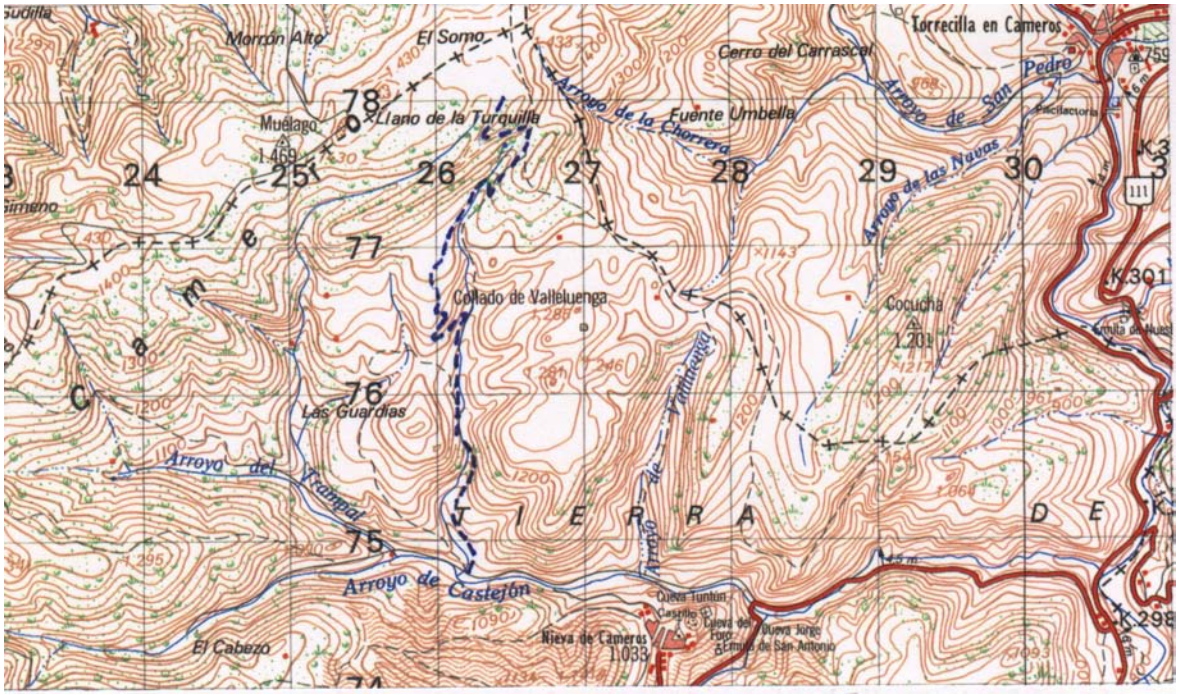
La construcción de la pista es anterior a los años 30. En la actualidad, se utiliza para la explotación forestal, la utilización de pastos de alta montaña, la lucha contra incendios, la caza mayor, la pesca, extracción de hongos y otras actividades de ocio.

4.1.3. Pista de Nieva-Gamellones (P3)

Más al norte, en el borde septentrional de Cameros Nuevo, se localiza la pista forestal de Nieva-Gamellones (P3) (Mapa 4.4 y Foto 4.3) que, próxima al interfluvio entre los valles del Najerilla y del Iregua, pertenece al término municipal de Nieva. Se trata de una vía secundaria que, partiendo de los 980 m, recorre el arroyo de Castejón y asciende por el barranco de Valleluenga hasta el Llano de la Turquilla (1430 m), en la plataforma calcárea de los Gamellones.

Los materiales predominantes del sector son las calizas del Jurásico que han dado origen a un conjunto de relieves en cuesta, hog-backs y crestas que ofrecen escarpes con taludes de derrubios, algunos de los cuales son cortados por la propia pista forestal. La topografía, pues, es abrupta, aunque en algunos sectores los relieves se suavizan como ocurre en las plataformas que deja la pista a los 1240 y 1300 m antes de alcanzar los Gamellones. Esta planicie, de planta fusiforme, en sentido SO-NE, de unos 6 km de longitud por 1-2 km de anchura, con una inclinación hacia el O y NO de menos de 10º, es interesante desde una perspectiva geomorfológica por el complejo kárstico que ha desarrollado condicionado por los materiales calcáreos y la

organización de las fracturas. En concreto, en este paraje se observa un modelado exocárstico de lapiaces de diverso tipo, dolinas generalmente disimétricas y uvalas alargadas que se continúan, en menor medida y en forma de lapiaces, por las líneas de cumbres calcáreas de Cameros Nuevo (Pellicer, 1985).



Mapa 4.4. Recorrido de la pista Nieva-Gamellones (P3) sobre el mapa del Servicio Geográfico del Ejército E. 1:50.000. Hoja de Anguiano.

La vegetación y los suelos lógicamente están muy condicionados por el substrato rocoso. Abunda a lo largo de todo el recorrido el boj *(Buxus sempervirens)* mezclándose con *Genista scorpius,* rosáceas *(Rosa canina, Rosa pouzinii)*, endrinos *(Prunus spinosa)* y majuelo *(Crataegus monogyna)*. En el fondo de los arroyos aparecen arces *(Acer campestre)* y quejigos *(Q. faginea).*

Los suelos dominantes son las rendsinas sobre calizas con áreas de Terra Fusca de color ocre amarillento. Las rendsinas son suelos jóvenes poco evolucionados. La pedregosidad aumenta en profundidad, sobre todo en los suelos que se asientan sobre las gréezes litées. Son suelos con buena permeabilidad y mediano desarrollo estructural.

La pista es utilizada fundamentalmente por los ganaderos de Nieva que han construido e instalado fuentes y abrevaderos para el ganado. Se construyó con

anterioridad a 1977, a modo de trocha y en los últimos años (1993) ha sido reconstruida en su tramo inferior hasta la zona de pastos, con fondos del programa europeo Leader. Se le ha dotado de una calzada más amplia pero sus pendientes siguen siendo las mismas.

4.1.4. Pista forestal de Zenzano (P4)

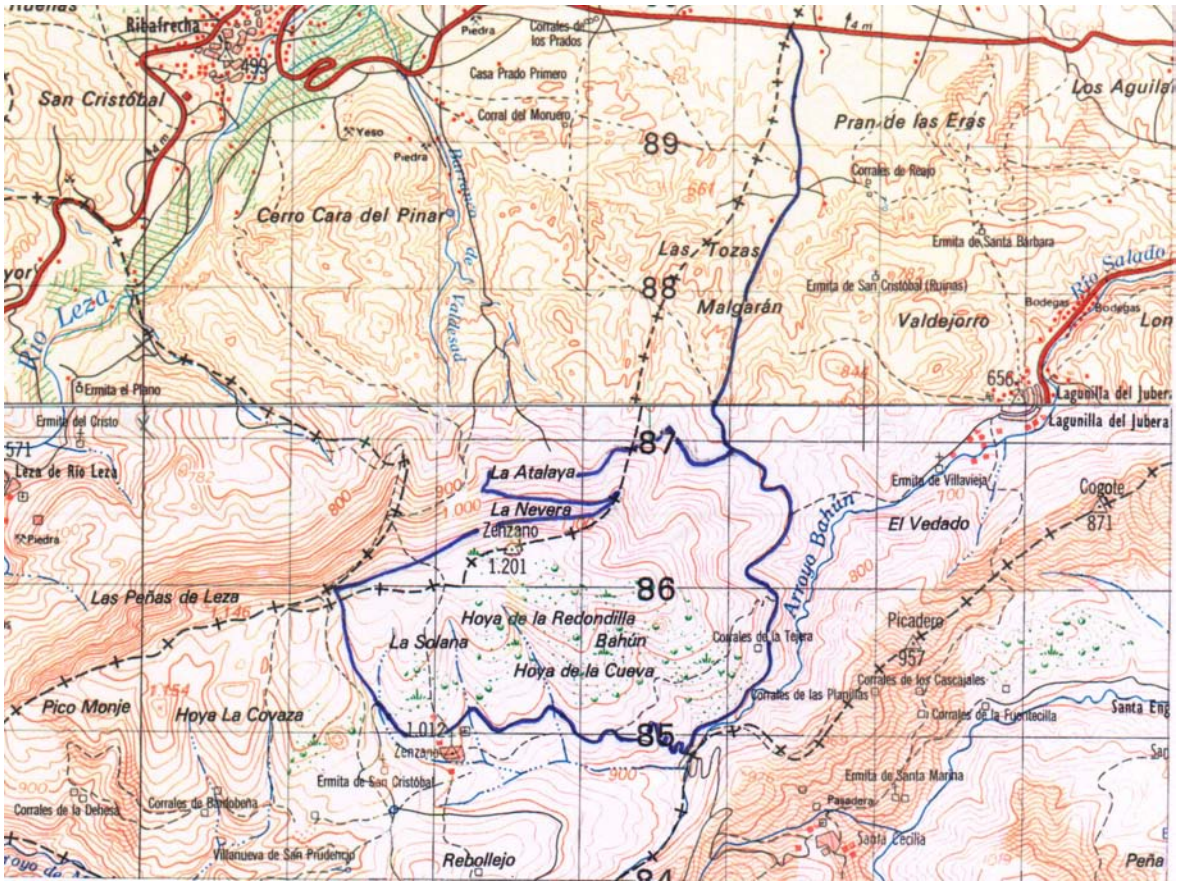
La pista forestal de Zenzano (P4) (Mapa 4.5) se encuentra entre el río Leza y el río Lagunilla, afluente del Jubera. Desde la carretera comarcal de Ribafrecha a Ventas Blancas un camino agrario se dirige a través de campos de cultivo de cereal y almendros hacia la montaña. La pista comienza en el límite de los campos cultivados (755 m) alcanzando los 1145 m. Desde aquí desciende hasta Zenzano, se aproxima al arroyo Bahún y regresa para encontrarse de nuevo con la pista de ascenso a 820 m, muy cerca del punto de partida.

La pista circula por un sector complejo desde un punto de vista geomorfológico condicionado por la falla cabalgante que limita la Sierra con la Depresión del Ebro, una amplia diversidad litológica y el encajamiento de la red fluvial. La falla cabalgante es un gran accidente tectónico que pone en contacto los materiales secundarios de la Cuenca de Cameros con las rocas terciarias de la Depresión del Ebro. El Trías de yesos blancos y grises del Keuper (Ribafrecha) sirve de nivel de despegue sobre el que se han deslizado las rocas jurásicas y cretácicas hasta situarse por encima de las areniscas terciarias (Casas Sainz et al. 1995; Gonzalo Moreno, 1981). Los materiales de la zona son yesos y arcillas del Keuper, calizas jurásicas y cuarzoarenitas, areniscas, limolitas, margas y calizas del Cretácico inferior (facies Weald). Estos materiales son cortados por la red fluvial originando, sobre todo en calizas, profundos cañones como los del Leza, entre Ribafrecha y Soto, Lagunilla o el barranco de San Martín, entre la aldea del mismo nombre y San Bartolomé. El paisaje se muestra entonces abrupto, con laderas prácticamente verticales y fondos de valle estrechos y encajados.

Las formas del relieve están controladas por los factores mencionados (litología y estructura). En los yesos se observan fenómenos de seudokarstificación. Las calizas han desarrollado ejemplos magníficos de dolinas y gréezes litées (Foto 4.4). Pero, sin duda, y como ya se ha indicado, las formas más repetitivas son los relieves en cuesta que, organizados a partir del eje sinclinal de Soto a Robres, se suceden, dirigiendo la red fluvial. Los frentes de cuesta, principalmente en calizas, se han visto afectados

por la acción del hielo-deshielo, encontrándose a sus pies canchales y taludes de derrubios inactivos pero que por sus dimensiones reflejan la importancia de estos procesos en periodos más fríos.

La vegetación presenta caracteres termófilos, xerófilos y gipsófilos. Hay un matorral mediterráneo basal, poco denso, de *Genista scorpius,* tomillo *(Thymus vulgaris)* y espliego *(Lavandula latifolia)*. Abundan las especies gipsófilas sobre los yesos del Keuper como *Gypsophila hispanica, Ononis tridentata, Helianthemum,* etc. En la umbría, los viejos taludes de derrubios están cubiertos por una repoblaciones de pino laricio con sotobosque; en la solana aparecen carrascas *(Quercus rotundifolia),* genistas, tomillo, espliego, rosáceas, cardos y verbascos que van recolonizando los campos abandonados próximos a Zenzano.



Mapa. 4.5 Recorrido de la pista Zenzano (P4) sobre el mapa del Servicio Geográfico del Ejército E. 1:50.000. Hojas de Logroño y Munilla.

Los suelos que recorre la pista son xerorendzinas –AC-, en la parte baja, sobre los yesos del Trías, y suelos pardo calizos –A(B)C-, con áreas de rendzinas y litosuelos. Desde el arroyo Salado hasta Zenzano se encuentran suelos pardo calizos forestales -A(B)C- sobre margas y calizas. La profundidad de los perfiles depende de la variada topografía del relieve.



Foto 4.3. Tramo de la pista de Nieva-Gamellones (P3) en el que se puede observar el mal estado de la calzada y algunos procesos de erosión en los taludes.



Foto 4.4. Detalle de los taludes superiores de las pista de Zenzano (P4).



Foto 4.5. Pista forestal de Santa Marina (P5). Anchura de la calzada y deslizamiento en T1.



Foto 4.6. Tramo alto de la pista Cornago-Sierra de Alcarama (P6) entre repoblaciones forestales.

En el sector por donde discurre la pista la deforestación, las quemas de matorral y el abandono de campos agrícolas han favorecido la degradación de los suelos. Aparecen serias muestras del arroyamiento superficial que elimina el suelo y deja al descubierto el substrato rocoso. En los yesos y arcillas se observan cárcavas y badlands

La construcción de la pista es relativamente reciente (1985-1988) y su uso es importante en verano. Es la única vía de comunicación que existe para acceder a las aldeas de Zenzano y Bucesta, no así para Santa Cecilia. También es utilizada por ganaderos, cazadores, excursionistas y aficionados al vuelo libre.

4.1.5. La pista forestal de Santa Marina (P5)

La pista forestal de Santa Marina (P5) (Mapa 4.6 y Foto 4.5), situada en el interior de Camero Viejo, en el valle del Jubera, da acceso desde el término de Robres del Castillo (750 m) a la aldea de Santa Marina (1245 m). Desde aquí otras pistas enlazan con el valle del Leza (Treguajantes), La Monjía, La Santa, Larriba, Munilla hacia el Sur, y Zenzano hacia el Norte, esta última de difícil tránsito. Consta de dos tramos: el primero asciende hasta la línea de cumbres, tras alcanzar la aldea de Dehesillas, el segundo recorre la línea de cumbres hasta Santa Marina.

La primera vía fue construida a comienzos de los 70 para prospecciones de petróleo. Fue mejorada, cambiando parte del trazado, y prolongada en 1987. En 1988 de nuevo se alargó su trazado y en 1989 alcanzó la aldea de Santa Marina. A partir de 1990 se han ido realizando permanentes mejoras en el firme de la pista. Durante el verano de 1994 fue asfaltada en su totalidad.

El relieve del sector se caracteriza por la sucesión de relieves en cuesta, divisorias muy suaves y altitudes medias. Desde la pista se observa muy bien el sinclinal del Jubera. La litología pertenece a la facies Puberck-Weald con predominio de materiales silíceos de textura grosera: cuarzoarenitas, limolitas y arcillas arenosas. La red hidrográfica es de trazado ortogonal aprovechando la estructura y la alternancia litológica.

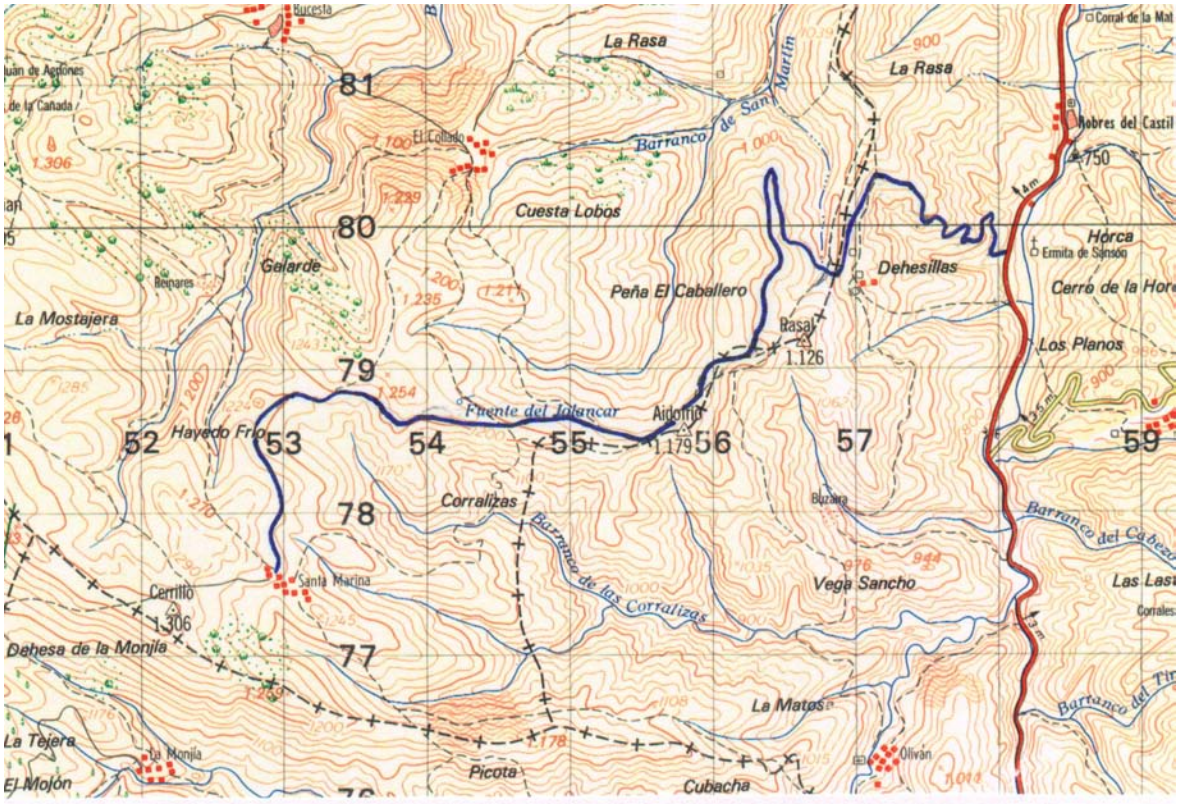
En la pista forestal son visibles una amplia variedad de procesos: arroyamiento superficial, movimientos en masa favorecidos por la escasa vegetación y el tipo de litología, y coladas de barro vinculadas a periodos de precipitaciones de gran intensidad. En las laderas que bordean la pista, repobladas con pinos, es habitual

comprobar la existencia de una lenta reptación del suelo.

Con respecto a la vegetación hay que indicar que la cubierta arbórea prácticamente ha desaparecido. Sólo pequeños bosquetes, a menudo poco densos, de *Quercus pyrenaica* quedan restringidos a las cabeceras de los barrancos. En un tramo destaca una repoblación de pino laricio *(Pinus nigra)*, aunque el conjunto vegetal predominante es el matorral: *Genista scorpius, Genista hispanica, Thymus vulgaris* y *Cistus laurifolius* en altitudes más altas.

Los suelos son tierras pardas meridionales sobre areniscas y arcillas. Su perfil es A(B)C, con un horizonte (B) cámbico con formación de arcilla y fuerte desintegración química en general.

La pista de Santa Marina se utiliza como vía de comunicación hacia las aldeas de Santa Marina, El Collado, Buzarra y La Monjía. Es aprovechada por el ganado para acceder a los pastizales y como vía de saca forestal para las repoblaciones existentes en la zona. También tiene un uso recreativo, sobre todo durante el verano.



Mapa 4.6. Recorrido de la pista Santa Marina (P5) sobre el mapa del Servicio Geográfico del Ejército E. 1:50.000. Hoja de Munilla.

4.1.6. La pista forestal de Cornago-Sierra de Alcarama (P6)

En el extremo oriental de Camero Viejo, en la cabecera del valle del Alhama, se sitúa la Sierra de Alcarama (1531 m). A ella ascienden diversas pistas desde los municipios de Cornago, Igea, Rincón de Olivedo, Aguilar del Río Alhama y Navajún. La pista que se ha denominado de Cornago-Sierra de Alcarama (P6) (Mapa 4.7 y Foto 4.6) parte de la carretera de Cornago a Igea y asciende en dirección SE atravesando el barranco de Valdecerezo. En sus primeros metros discurre entre campos de cultivo de almendros, vides, cereales y bancales abandonados. Cruza el barranco de Valdecerezo ascendiendo después a los corrales de Maizberita y Bajolombo. Desde aquí la pista discurre con una escasa pendiente bordeando por el norte el alto de la Nevera. Finaliza en un pastizal de la cabecera del barranco de Valdecerezo (1230 m), muy próximo a la provincia de Soria. Fue construida en varias fases a lo largo de 1971 y 1987.

El relieve del sector donde se instala la pista es de altitudes más bien modestas. Los materiales son variados estando representados los grupos Urbión (limonitas rojas, margas, alternancias pelítico samíticas) y Enciso (margas, alternancias pelitico-samíticas con calizas y margas intercaladas). En realidad en toda la Sierra de La Rioja Baja están bien representados la mayor parte de los grupos de la facies Purbeck-Weald.

En la Sierra de Alcarama los procesos erosivos tienen una importante actividad debido a la deforestación casi absoluta y a la intensidad que alcanzan las precipitaciones de carácter mediterráneo. No es extraño observar detalles de un intenso arroyamiento superficial e incisiones que afectan no sólo a las laderas sino también a la pista en puntos de deficiente drenaje. Los ríos han diseccionado las series calcáreas originando cañones profundos y pendientes en sus márgenes muy fuertes. La fracturación de la roca y la disposición de los estratos favorecen y dirigen las caídas de rocas y los desprendimientos de gran importancia en las laderas del barranco.

Las laderas están cubiertas por un matorral mediterráneo de aliagas *(Genista scorpius),* tomillos *(Thymus vulgaris)*, santolina *(Santolina chamaecyparissus)* y jaras *(Cistus laurifolius)* con algún enebro *(Juniperus oxicedrus)* en la zona más alta, por encima de los 1000 m. Junto a las jaras encontramos algunas especies de rosáceas *(Rubus fruticosus, Rosa canina, Crataegus monogyma, Prunus spinosa,* etc.) y juncos

en las zonas más húmedas. En las vaguadas, donde los cortes-taludes de la pista se encuentran saturados, a 1200 m, se observan madreselvas *(Lonicera ethrusca)*, mentas *(Mentha piperita)*, enebros etc. que contrastan con las especies xerófilas y termófilas.



Mapa 4.7. Recorrido de la pista Cornago-Sierra de Alcarama (P6) sobre el mapa del Servicio Geográfico del Ejército E. 1:50.000. Hoja de Cervera del Río Alhama.

El espacio debió estar poblado antaño por carrascales como los aún existentes en la cercana Sierra de Archena o en las inmediaciones de Igea y Rincón de Olivedo, en la misma Sierra de Alcarama. De estos antiguos bosques quedan algunas carrascas aisladas como testigos. A partir de los 1100 m y en las vertientes oriental y

meridional del alto de la Nevera existen repoblaciones de pino laricio en buen estado. La zona entre los 1000 y los 1250 m, la más alta por la que discurre la pista, ha sido repoblada con pino laricio hace aproximadamente unos dieciocho o veinte años.

La pista se usa para acceder al puesto de vigilancia contra incendios de Alcarama, para explotar la repoblación de pino laricio de la falda del alto de la Nevera y para el paso del ganado a los pastizales o corrales de la cabecera del barranco de Valdecerezo. También permite el acceso a las fincas todavía cultivadas de cereal, almendros y nogales, y a las zonas de caza del coto. La reciente construcción del parque eólico de Alcarama ha obligado a su reacondicionamiento. En concreto, han variado algunos tramos como el cruce del barranco de Maizberita, donde ya se han desencadenado algunos deslizamientos; se han construido nuevas alcantarillas y se ha mejorado la entrada y salida de camiones.

4.1.7. La pista La Villa de Ocón-Arnedillo (P7)

Esta pista se construyó hace unos 20 ó 22 años para sustituir a otra anterior, estrecha y empinada, que ascendía hacia Cabimonteros. El tramo que desciende hacia Arnedillo se construyó en distintas etapas. La pista se sitúa sobre los conglomerados de borde de cuenca, en el Terciario de la Depresión del Ebro, en el límite meridional del valle de Ocón, y conecta con otras pistas que se dirigen hacia Las Ruedas y Carbonera, al sur; Bergasa y Bergasillas, al este; San Vicente de Robres, al oeste; Munilla, Zarzosa, Larriba, al suroeste; y Arnedillo, al sur.

La pista (Mapa 4.8) parte de La Villa de Ocón (905 m). Una vez sobrepasados los huertos de La Villa (920 m), y tras atravesar los antiguos campos de cultivo en pendiente, penetra en un bosque de rebollo, remonta el barranco de Santa Lucía y asciende a Cabimonteros. En su trayecto deja a sus márgenes varios cortafuegos y ramales secundarios. Alcanzado el punto más elevado de la pista (1320 m), desciende hacia el término de Arnedillo, al sur, tras recorrer un buen tramo de la línea de cumbres.

El relieve de la zona es muy suave, tanto en las cumbres (altitud máxima: Cabimonteros, 1388 m) como en las laderas regularizadas que dan al conjunto un aspecto masivo. Estos relieves se han configurado sobre los conglomerados terciarios de borde de cuenca, datados como vindobonienses por el IGME (1980) y pontienses por Pérez Lorente et al. (1989). Se trata de un depósito discordante con las formaciones anteriores, compuesto por gravas gruesas rodadas y envueltas en una

matriz fina areno-arcillosa sin compactar que originan vertientes regularizadas (Foto 4.7). Se interpretan como partes proximales de un sistema de abanicos aluviales cuya área fuente está constituida por las series weáldicas de Cameros.

Estos conglomerados han sido diseccionados por una red fluvial dendrítica**,** de fuerte erosión remontante que ha individualizado pequeñas cuencas y divisorias dispuestas de manera divergente. En la cabecera de los barrancos y arroyos aparecen unas formas a modo de canchales de compleja explicación. Según García-Ruiz y Arnáez Vadillo (1991), parecen ser debidos a pequeños movimientos en masa desde las vertientes hacia la concavidad de la cabecera del barranco, acompañados de exportación de finos. También se pueden observar en las cuencas más degradadas cabeceras activas de barrancos, sobre todo en la vertiente sur. Algunos de estos barrancos han experimentado un fuerte proceso de encajamiento, con generalización de movimientos en masa en las laderas más próximas al cauce.

La pista, tras atravesar una estrecha franja de areniscas y limolitas, dicurre en su mayor parte en pudingas de matriz limo-arcillosa. El recorrido final de la pista acaba entre materiales predominantemente calcáreos –calizas y margas, con tramos detríticos intercalados del cretácico inferior-. Una falla de dirección NNO-SSE cruza el sector del arroyo de las Hoyas y la pista afectando a los materiales del Cretácico inferior y del Jurásico. Esta falla se puede relacionar con la aparición de algunos deslizamientos rotacionales.



Foto 4.7. Conglomerados sueltos y jaral. Pista Ocón-Arnedillo (P7).



Mapa 4.8. Recorrido de la pista La Villa de Ocón-Arnedillo (P7) sobre el mapa del Servicio Geográfico del Ejército E. 1:50.000. Hoja de Munilla.

El sector recorrido en parte por la pista forestal es el único enclave arbolado con hayedos y rebollares en medio de un área muy deforestada de montaña mediterránea en la que predominan los matorrales de jara *(Cistus laurifolius) y* aliaga *(Genista scorpius)*. Las laderas han sido deforestadas principalmente en las solanas donde los campos de cultivo en pendiente alcanzaron los 1200 m y los bancales más de 1000 m. En estas laderas, antiguamente cultivadas, predomina el matorral de aliaga *(Genista scorpius)* y tomillo *(Tymus vulgaris)* en las zonas bajas y la estrepa en las más altas por encima de los 900 m.

Los suelos son muy variados. Al norte se observan tierras pardas sobre los depósitos alóctonos pedregosos de Cabimonteros (cambisoles dístricos A(B)C). Son suelos muy permeables y de alta pedregosidad en todo el perfil. También las tierras pardas se encuentran sobre las areniscas y arcillas de la vertiente sur por debajo de los 1000 m de altitud. Por último, los suelos pardos calizos forestales, con áreas de rendzina y tierra parda (cambisoles calcáricos) aparecen en las proximidades de Arnedillo (VV.AA., 1970; Machín, 1984).

La pista cumple diversas funciones. Se utiliza como vía de acceso para la protección, conservación y gestión del monte, para la práctica de la caza de especies migratorias, para acceder a los pastos de montaña desde los municipios y aldeas de la zona (La Villa, San Vicente, Arnedillo, Las Ruedas), para alcanzar las zonas recreativas de fuente Tosca y fuente Pata la Mora, y para visitar huellas de dinosaurios en la vertiente de Arnedillo. Aquí, recientemente se ha marcado la pista para su ampliación y reacondicionamiento con objeto de extraer roca para la presa de Enciso. Asimismo se están construyendo nuevas pistas dentro de un plan de reforestación financiado con fondos europeos.

4.2. Morfometría y cubrimiento vegetal

4.2.1. Características morfométricas de las pistas

Si en el apartado anterior se ha repasado la diversidad ambiental de los espacios geográficos en los que se insertan las pistas forestales, en éste se pretende conocer algunos otros datos de interés sobre sus características técnicas.

En la Tabla 4.2 se han incluido algunos datos básicos y en la Figura 4.1 se ha dibujado un esquema con las medias de todos los casos analizados. Como se puede

comprobar, las longitudes de las pistas oscilan entre los 5.4 Km de Nieva-Gamellones (P3) y los 18.4 Km de Ocón-Arnedillo (P7). Es necesario indicar que estas longitudes han sido las recorridas para el muestreo, pues, como es lógico, muchas de estas pistas tienen continuidad, enlazando con otros ramales.

4.2. Morfometría de las pistas estudiadas

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Longitud (Km)	17	14.7	5.4	14.5	11.1	12.6	18.4
Alt.max. (m)	1525	1980	1430	1145	1245	1230	1320
Alt.min. (m)	970	1200	980	755	750	740	720
Desnivel (%)	6.3	5.3	8.3	5.8	4.4	3.8	5.5
Altura T1 (m)	1.9	2.7	0.9	2.1	1.6	2.6	2.3
Angulo T1 (º)	50.2	50.8	44.2	40.6	34.8	42.1	40.7
Long. T2 (m)	3.5	6.9	3.4	4.6	4.8	5.5	3.4
Angulo T2 (º)	37	35	31	35	32	35	31
Anchura (m)	6.2	6.8	3.4	6.3	7.9	5.2	6.5
Pend. Ladera (º)	20.6	18.9	19.2	19.7	14.5	20.3	16.3
Antigüedad	antes de 1977	1973-80	1978-89	1985-88	1987-88	1980-84	1987-88

La pista que parte de una menor altitud es la de Ocón-Arnedillo (P7), aunque todas comienzan entre los 700 y 900 m, a excepción de la de Hoyos de Iregua que lo hace a 1200 m. La pista que alcanza una mayor altitud es la de Hoyos de Iregua (P2): 1820 m al finalizar la pista y 1980 m en la trocha de la línea de cumbres. Las altitudes máximas de las pistas descienden hacia el este en relación con la menor entidad de los relieves de este sector.

Los desniveles salvados por las pistas forestales son muy variados. Sin duda, es la pista de Nieva-Gamellones (P3) la más empinada, pues se ha calculado un desnivel medio de 8.3%. Por el contrario, la de Cornago (P6) presenta la pendiente más suave, con un 3.8% de desnivel. Estos cálculos medios esconden los fuertes desniveles que la mayor parte de la pistas superan en algunos tramos de su trazado.

Con relación a las dimensiones de las pistas, se han recogido los datos de distintos sectores. La altura media del corte-talud (T1) para el conjunto de las pistas es de 2

m; esta altura es superior en Hoyos de Iregua (P2): 2.7 m; en Cornago-Sierra de Alcarama (P6): 2.6 m; en La Villa de Ocón-Arnedillo (P7): 2.3; y en Zenzano (P4): 2.1 m. En el resto de las pistas los valores se encuentran por debajo de la media: 1.9 m, en Valgañón-Ezcaray (P1); 1.6 m, en Santa Marina (P5) y 0.9 m, en Nieva.

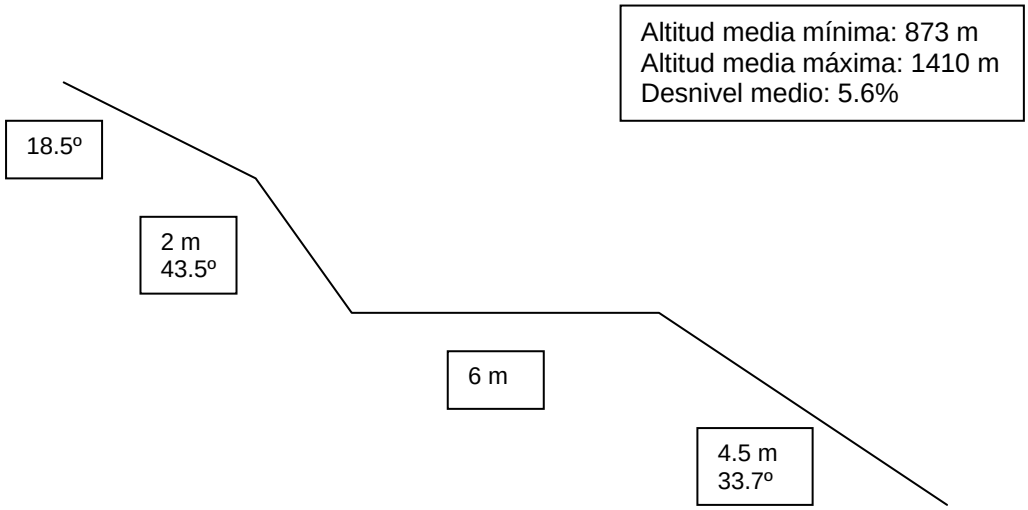


Fig. 4.1. Sección de pista forestal y datos morfométricos medios.

El ángulo o inclinación medio del corte-talud (T1) es de 43.5º. Las pistas de Hoyos de Iregua (P2) y Valgañón-Ezcaray (P1) presentan los cortes más inclinados, con valores ligeramente superiores a los 50º. En algunas zonas muestreadas esta pendiente puede alcanzar los 70º sobre calizas y cuarzarenitas.

En cuanto al talud inferior (T2), se ha anotado también en la tabla 4.2 la longitud y el ángulo de inclinación. La longitud media para todas las pistas es de 4.5 m. No obstante, las pistas de Hoyos de Iregua (P2) y la de Cornago-Sierra de Alcarama (P6) superan ampliamente este valor: 6.9 y 5.5 m. Con respecto a las pendientes de los taludes inferiores, en todos los casos son inferiores a los anotados para T1. La media calculada es de 33.4º.

La anchura media de la calzada en las pistas es de 6 m. La más ancha corresponde

a Santa Marina (P5) (7.9 m), remodelada recientemente. La más estrecha es la de Nieva-Gamellones (P3) (3.4 m). En cualquier caso, y a excepción de la última indicada, ninguna cuenta con una anchura inferior a los 5 m.

En las tablas 4.3 y 4.4 se relacionan por medio de correlaciones algunas de estas variables. El nivel de significación elegido ha sido el 0.01. Como se puede comprobar, en el corte-talud (T1) se observa una significativa y positiva correlación entre la pendiente de la ladera, el ángulo del talud (0.46; p=0.00), la altura (0.46; p=0.00) y longitud (0.37; p=0.00). La relación es negativa entre la pendiente de la ladera y la anchura de la calzada (-0.30; p=0.01). Estos datos indican la necesidad de construir un corte talud de mayores dimensiones y de estrechar la calzada cuando las laderas presentan una fuerte inclinación. Resultados muy parecidos se obtienen en T2.

Tabla 4.3. Correlaciones entre las distintas características morfométricas de las pistas para el corte-talud (T1)

	Angulo T1	Pend. Ladera	Altura T1	Long. T1	Anch. calzada
Angulo T1	*				
Pend. Ladera	**0.46**	*			
Altura T1	**0.33**	**0.46**	*		
Longitud T1	0.07	**0.37**	**0.95**	*	
Anch. calzada	-0.10	**-0.30**	0.00	0.05	*

En negrita los valores significativos al 0.01

Tabla 4.4. Correlaciones entre las distintas características morfométricas de las pistas para el talud inferior (T2)

	Angulo T2	Pend. Ladera	Longitud T2	Anch. Calzada
Angulo T2	*			
Pend. Ladera	**0.46**	*		
Longitud T2	0.27	0.31	*	
Anch. Calzada	0.01	**-0.40**	-0.07	*

En negrita los valores significativos al 0.01

4.2.2. Tipología y clasificación de taludes

Para completar la descripción de las pistas forestales se han analizado, a partir del levantamiento de perfiles, las formas de los taludes. Se han clasificado y se ha intentando describir la evolución de los modelos más representativos. El estudio se ha centrado en el corte-talud (T1).

El método de clasificación ha consistido en comprobar, en primer lugar, las unidades que constituyen un perfil. En segundo lugar, se han definido estas unidades a partir de la terminología específica: escarpe (*), elemento convexo (X), elemento cóncavo (V) y segmento rectilíneo (R). Por último, se han caracterizado las unidades teniendo en cuenta su pendiente y longitud (% con respecto al total). Una metodología muy semejante fue utilizada por Calvo (1987) para clasificar las formas de laderas en las montañas del País Valenciano.

En los segmentos del corte-talud (T1) muestreados se han encontrado 28 tipos de perfiles, aunque sólo 6 tipos son los más repetidos: tres corresponden al grupo de los perfiles denominados de cornisa-talud y tres al que sólo incorpora un talud (Tabla 4.5 y Fig. 4.10).

Perfil 1 (*R). Está configurado por un escarpe en la unidad superior, que viene a representar el 30% de la longitud media del perfil y dispone de una pendiente de 81.7º, y un talud rectilíneo de gradiente mucho más suave (30.6º).

Perfil 2 (*XR). Se trata también de un perfil mixto, formado por un escarpe, un elemento convexo y otro rectilíneo. El primero dispone de una pendiente de 81.6º y supone el 17.5% de la longitud del perfil; el segundo, con una pendiente de 56.6º, representa el 56.3% del perfil; el último tiene una inclinación de 35º y una longitud que representa el 26.1%.

Perfil 3 (*RV). Está formado también por un pequeño escarpe en la unidad superior de dimensiones más reducidas que en el caso anterior (7.4% del total del perfil). El talud dispone de un sector con forma recta (33.2º de pendiente) y otro de forma cóncava, con una inclinación de 49.7º.

Perfil 4 (R). Se trata de un perfil simple, recto, con una pendiente media de 47.5º.

Perfil 5 (X). Es también un perfil simple. Presenta una forma convexa y la pendiente media es de 39º.

Perfil 6 (RV). Este tipo de perfil dispone de dos componentes: uno, recto, con

pendiente de 25º, y otro, cóncavo, con inclinación ligeramente superior, 35º.

Tabla 4.5. Perfiles de los cortes-taludes (T1) de las pistas forestales

	Tipo	Segmento	Pendiente (º)	Long. (%)	casos
Perfil 1	*R	* R	81.7 30.6	30.6 69.3	9
Perfil 2	*XR	* X R	81.6 56.6 35.0	17.5 56.3 26.1	3
Perfil 3	*RV	* R V	85.0 33.2 49.7	7.4 36.3 56.2	4
Perfil 4	R	R	47.5	100	4
Perfil 5	X	X	39.0	100	9
Perfil 6	RV	R V	25.0 35.0	44.5 55.5	2

Los datos expuestos animan a plantear distintas hipótesis de evolución de los taludes de las pistas. Si se parte de un corte-talud (T1) inicial abierto en la ladera, para los perfiles de tipo 1 se presentan dos posibilidades de evolución dependiendo de las características de los materiales que componen el talud.

Si el corte-talud intercepta un estrato rocoso, el modelo de evolución podría ser muy semejante al reseñado en la literatura geomorfológica para las laderas de cornisa-talud *(slope replacement)*. Es decir, los procesos de meteorización, principalmente hielo-deshielo, fracturan el escarpe que sufre un proceso de retroceso. Las rocas caídas se acumulan al pie hasta configurar un talud regularizado, en el que predomina los materiales más o menos groseros.

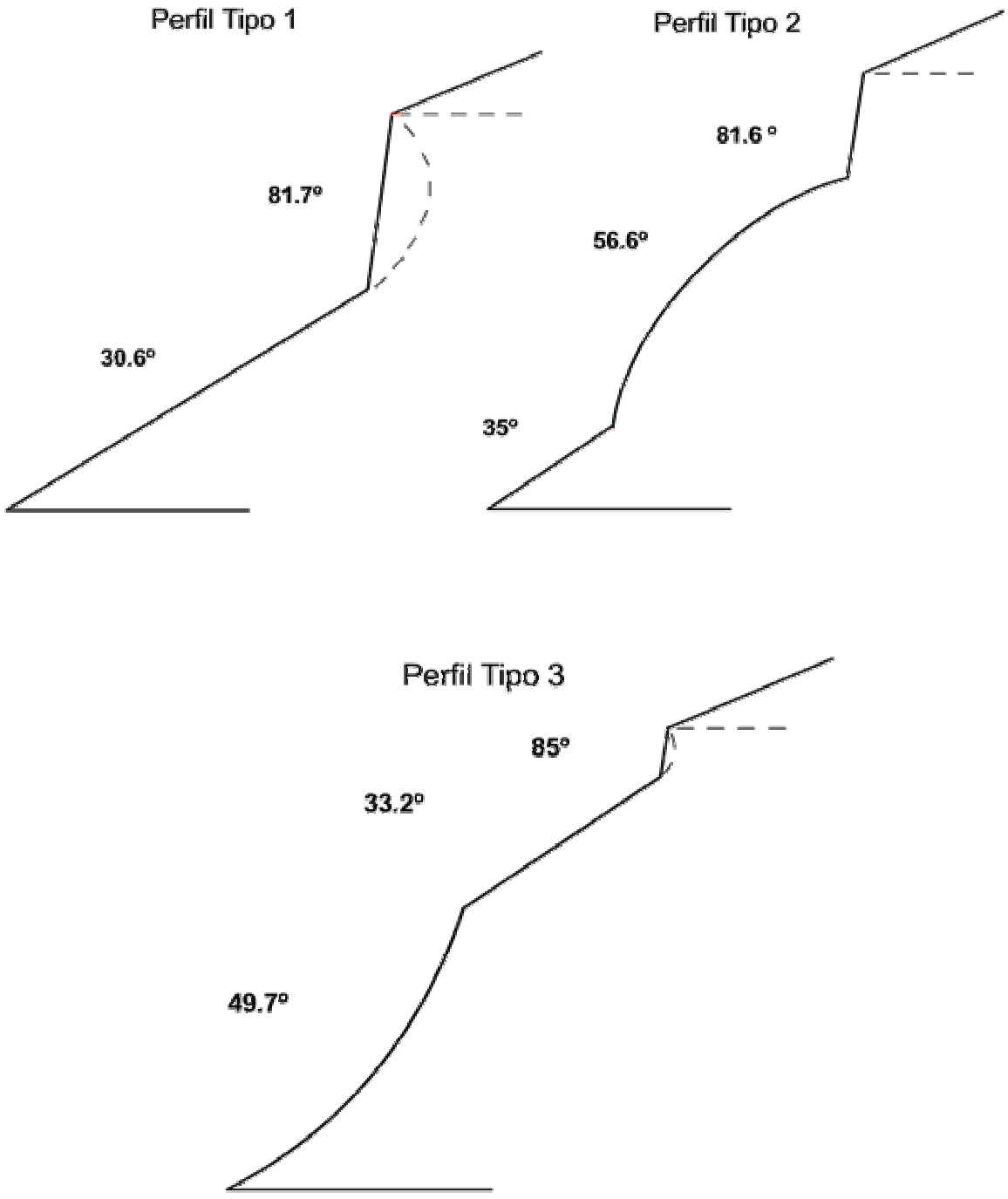


Fig. 4.2. Tipos de perfiles en el corte-talud (T1) y su evolución (tipos 1, 2 y 3)

Cuando el talud de la pista se ha abierto en materiales no rocosos (suelos potentes, manto de derrubios, materiales arcillosos), puede permanecer un pequeño escarpe en el sector superior como consecuencia de la protección y sujeción que supone la presencia de raíces de los árboles y arbustos de la ladera. Al pie de este escarpe normalmente se produce un socavamiento, en algunos casos ayudado por la circulación de las escorrentías subsuperficiales (Arnáez Vadillo, 1984, Arnáez & García Ruiz, 1984), que deja la pequeña cornisa en posición de extraplomo. El propio peso del escarpe unido al de la vegetación finalmente favorecen su caída y retroceso, acumulándose el material en un talud de 30 a 35º.

En estados avanzados de evolución el escarpe reduce sus dimensiones y los taludes se modelan a partir de distintos procesos de erosión. Si lo que predomina son los movimientos en masa (reptación, solifluxión, coladas de barro) el talud puede adquirir una configuración convexa, con incremento de la pendiente (perfil tipo 2). Si la erosión se centra en la unidad inferior a partir de deslizamientos o erosión laminar, ésta adquiere una forma cóncava también de elevada pendiente (perfil tipo 3). El proceso evolutivo tenderá con el tiempo a crear un perfil simple o compuesto, pero ya sin escarpe a modo de los perfiles tipo 4, 5 ó 6.

La morfología de estos últimos perfiles también hace pensar en una evolución de taludes a partir del denominado rebajamiento *(slope decline)*. Es decir, a partir de una etapa inicial con un talud de fuerte pendiente, y como consecuencia de diversos procesos de erosión, ligados en este caso a pequeños movimientos en masa (actividad de pipkrakes) y, sobre todo, a escorrentías superficiales (arroyamiento difuso severo e incisiones), el perfil va reduciendo su inclinación lentamente. Según los datos de campo al perfil tipo 4 le sucedería, con una suavización de la pendiente el perfil-tipo 5; por último, el perfil 6 evidenciaría un estado de mayor madurez, aunque rejuvenecido en su mitad inferior por diversos procesos que han vuelto a incrementar la pendiente del segmento. Este incremento puede deberse a la aparición de movimientos en masa como consecuencia de la inestabilidad que, al pie del talud, acelera la circulación de las aguas encauzadas de los drenajes.

El talud inferior (T2) presenta unos perfiles mucho más simples y repetidos que los ya analizados para T1. Recordemos que está configurado a partir de un derrubio suelto proveniente de la excavación de la ladera. Es explicable, pues, que en su mayor parte presenten perfiles simples. Los perfiles más comunes son los rectilíneos y

cóncavos. Concretamente, el 38 % son taludes rectilíneos con una pendiente de 34.2º. En menor proporción aparecen perfiles cóncavos (19 %), con una pendiente de 34º y convexos (10.3 %), con una inclinación de 36.3º.

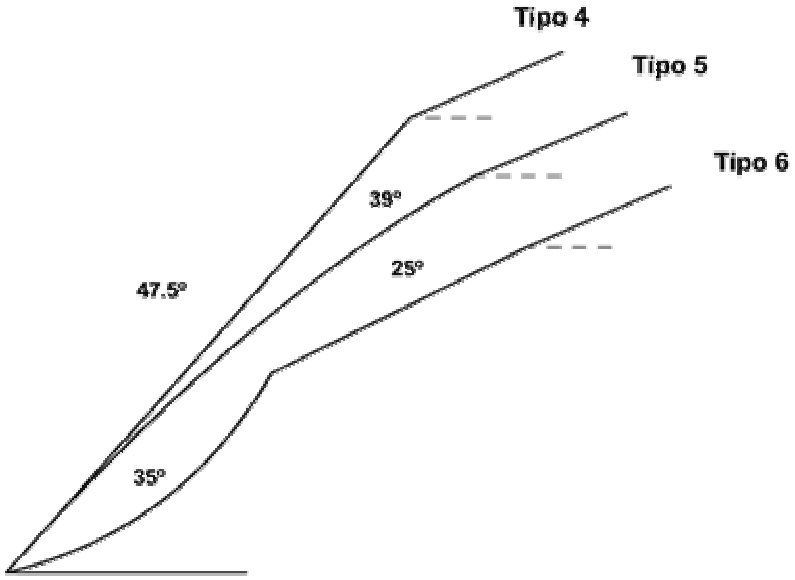


Fig. 4.3 Tipos de perfiles en el corte-talud (T1) y su evolución (tipos 4, 5 y 6).

4.2.3. El cubrimiento vegetal de taludes

A los taludes de las pistas forestales estudiadas no se les ha aplicado ningún tratamiento de repoblación vegetal, medida utilizada en algunos casos para garantizar la estabilidad, proteger el suelo de la erosión y disminuir el impacto paisajístico que suponen este tipo de viales. No obstante, una vez construidas las pistas, los taludes y las calzadas, inicialmente desnudos, comienzan a ser recolonizados con mayor o menor rapidez a partir de la vegetación existente en la ladera (Fotos 4.8 y 4.9). El objetivo de este apartado es explicar a grandes rasgos las características, organización espacial y dinámica del cubrimiento vegetal en estos taludes.

Como ya se ha indicado en la metodología, en cada talud muestreado se recogió, por un lado, información del porcentaje de cubrimiento vegetal y, por otro, una relación de las especies más representativas. Éstas han sido reclasificadas en tres

categorías que facilitan notablemente la manipulación estadística de los datos:

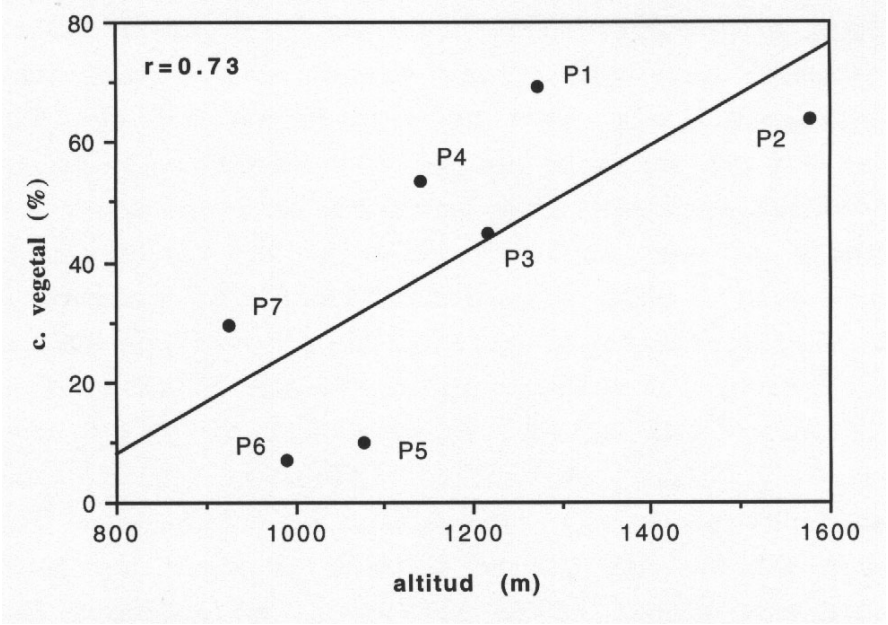
a) Vegetación arbórea. Las especies más representativas dentro de este grupo son: el haya *(Fagus silvatica),* el pino silvestre *(Pinus sylvestris),* el pino laricio *(Pinus nigra),* el roble *(Quercus pyrenaica),* el quejigo *(Quercus faginea)* y la carrasca *(Quercus ilex rotundifolia).*

b) Matorral. Las especies que se incluyen en esta categoría son: brezos *(Erica australis ssp. aragonensis, Erica arborea, Erica cinerea, Erica vagans)*, brecina *(Calluna vulgaris)*, enebro *(Juniperus nana)*, piorno *(Cytisus purgans),* arándano *(Vaccinium myrtillus),* escoba *(Genista florida),* retama *(Cytisus scoparius),* jara *(Cistus laurifolius*), cantueso *(Lavandula stoechas),* tomillos *(Thymus vulgaris, Thymus mastichina, Thymus zygis),* aulagas *(Genista hispanica, Genista scorpius),* espliego *(Lavandula latifolia),* romero *(Rosmarinus officinalis),* boj *(Buxus sempervirens),* endrino *(Prunus spinosa),* rosales *(Rosa canina, Rosa pouzinii),* majuelo *(Crataegus monogyna),* y zarzamora *(Rubus fruticosus).*

c) Vegetación herbácea: escabiosa *(Knautia arvensis, Succisa pratensis),* almizclera *(Erodium moschatum),* digital *(Digitalis purpurea),* fresa silvestre *(Fragaria vesca),* gordolobos *(Verbascum pulverulentum, Verbascum Thapsus),* gramíneas *(Deschampsia flexuosa, Lolium perenne, etc.),* chirivita *(Bellis perennis),* cardos *(Eryngium campestre, Echinops ritro, Silybum marianum, Onopordum acanthium, Cirsium arvense),* centaureas *(Centaurea calcitrapa, Centaurea nigra, Centaurea jacea),* pulicaria (*Pulicaria dysenterica),* cerraja común *(Sonchus asper),* ortiga *(Urtica dioica),* lamio *(Lamium purpureum, L. maculatum),* viborera *(Echium vulgare),* buglosa *(Anchusa officinalis),* menta *(Mentha sp.),* tréboles *(Trifolium pratense, Trifolium repens),* nazareno *(Muscari comosum), Silene vulgaris,* achicoria *(Cichorium intybus),* milenrama *(Achillea millefolium),* carlina de monte *(Carlina vulgaris),* llantén menor *(Plantago lanceolata),* correhuelas *(Calistegia sepium, Convulvus arvensis),* alcaravea *(Carum carvim),* matacandil *(Sisybrium irio),* rabo de gato *(Sideritis hirsuta),* abrotano hembra *(Santolina chamaecyparissus),* gatuña, *(Ononis spinosa),* primavera *(Primula veris)* siempreviva *(Helichrysum stoechas),* helecho *(Pteridium aquilinum*), lastón *(Brachypodium retusum)...*

En el conjunto de las pistas estudiadas el porcentaje medio de cubrimiento vegetal de los taludes es del 40.3%. Por tipos de vegetación es el matorral el que ocupa una mayor superficie, con un 14.4%. En segundo lugar, destaca la cubierta herbácea (14%) y, finalmente, la arbórea (11.9%). Un análisis de las pistas de forma individualizada permite observar notables diferencias que reflejan, en definitiva, las condiciones ambientales en las que se inscriben y la altitud por la que discurren. Como se comprueba en la figura 4.4, el porcentaje de cubrimiento vegetal se reduce a medida que nos trasladamos hacia el este y la altitud desciende (de P1-P2 a P5-P6-P7). La mayor sequedad de la montaña oriental y la degradación ambiental consecuencia de la histórica e intensa actuación antrópica dificultan procesos de recolonización en las laderas y en los taludes de pistas forestales.

Fig. 4.4. Cubrimiento vegetal en las pistas forestales en relación con su altitud media.



Si se distingue dentro de una pista forestal el corte-talud (T1) y el talud inferior (T2), los valores hasta ahora comentados se modifican tanto por lo que respecta al grado de cubrimiento como a los grupos de vegetación. A partir de la Tabla 4.6 se puede indicar que en el talud superior la vegetación ha recolonizado sólo el 21.8% de su superficie, apreciándose un mayor dinamismo del matorral y las herbáceas (7.5% y 10.2%, respectivamente). Por el contrario, en el talud inferior la revegetación alcanza

el 59%, destacando la importancia que adquieren la cubierta arbustiva y arbórea.

Tabla 4.6. Cubrimiento vegetal en los taludes de las pistas forestales (%)

Talud	c. arbórea	matorral	c. herbácea	total
T1	4.0	7.5	10.2	21.8
T2	19.9	21.3	17.7	59.0

Estos resultados ponen de manifiesto la adaptación de las distintas especies vegetales a las características de ambos taludes. El corte-talud (T1) presenta una pendiente más inclinada y una mayor actividad, como veremos más adelante, de los movimientos en masa (deslizamientos) que dificultan el enraizamiento de las plantas. En concreto, y por lo que respecta al primer aspecto, la inclinación media de estos taludes es de 43.5º mientras que la superficie media afectada por deslizamientos ha sido evaluada en un 16.5%. En el talud inferior (T2) la reintroducción de la vegetación resulta más fácil, si se tiene en cuenta la menor pendiente media (34º) y las características del material que conforman estos sectores: restos de suelo y derrubios sueltos, acompañados de una matriz fina, que facilitan el agarre de las plantas (Foto 4.10). Incluso no hay que olvidar que este material proviene de la sección de la ladera que hubo que remover para la apertura de la pista forestal. No es extraño, pues, que en él hayan permanecido semillas que han brotado posteriormente. Tampoco es inhabitual en laderas cubiertas de bosque que el material de desmonte sólo haya enterrado al arbolado parcialmente (primeros centímetros o metros del tronco). Éstos, enraizados al suelo de la ladera siguen su crecimiento, pudiendo favorecer el desarrollo de un pequeño sotobosque en el talud (Foto 4.9).

Si se estudia la distribución de la vegetación dentro del propio talud, distinguiendo tres sectores (superior, medio y pie de talud) (Fig. 4.5), se comprueba que en T1, el sector superior (SA) manifiesta los porcentajes de cubrimiento vegetal más elevados (30.2%), seguido por el pie del talud (SC): 21.3%. Por el contrario, el sector medio del talud (SB) se encuentra mucho más desnudo, ya que sólo logra un cubrimiento del 13.4% (Tabla 4.7). Esta distribución se mantiene tanto para la vegetación arbórea como para el matorral. Los datos ponen de manifiesto las mejores condiciones del sector superior, húmedo en la medida que a él van a parar las escorrentías subsuperficiales que circulan por los primeros centímetros del suelo, y próximo a las

especies vegetales que cubren la ladera de las que partirá el proceso de recolonización. El pie del talud se beneficia del material proveniente de las partes altas del talud, en muchos casos bloques de suelo que descienden acompañados de vegetación, semillas y nutrientes (Foto 4.12). También el agua tiende a acumularse en estos sectores, sobre todo si no existen adecuados sistemas de drenaje. El sector intermedio (SB), sin suelo ni materia orgánica y con mayor pendiente, cuenta con el menor porcentaje de cubrimiento vegetal.

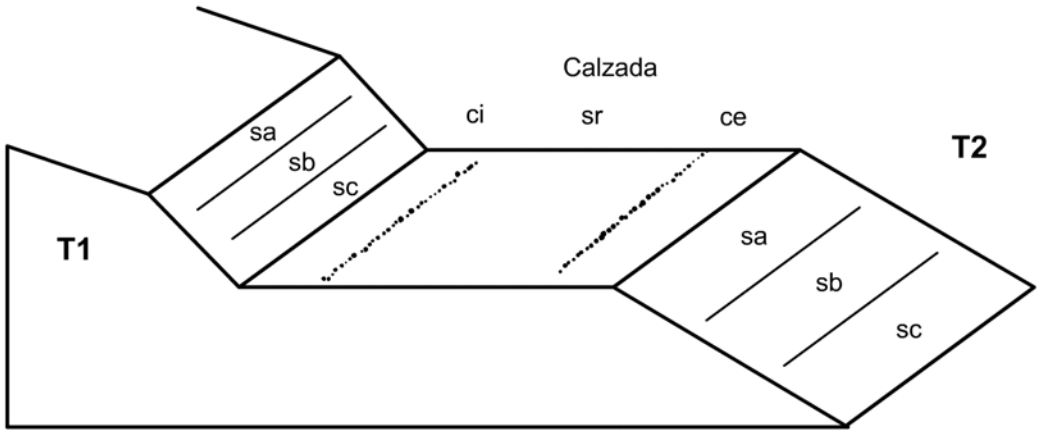


Fig. 4. 5. Secciones consideradas en los taludes (T1 y T2) de las pistas forestales: sector superior (SA), sector medio (SB) y sector inferior o pie del talud (SC)

En el talud inferior (T2) los mayores porcentajes de cubrimiento vegetal se encuentran en el pie del talud (SC), con un 65.2%. Aquí la cubierta arbórea es muy superior a los otros tipos de vegetación. En el sector superior (SA) y medio (SB) el cubrimiento alcanza el 56.3% y 55.2%, respectivamente. Como en el caso anterior, puede vislumbrarse una cierta relación entre el sector con mayor porcentaje de vegetación y la proximidad a los núcleos a partir de los cuales comienza el proceso de revegetación (en el talud inferior la ladera aguas abajo de la pista). En T2, y por lo que respecta a la cubierta arbórea, se dispone de árboles jóvenes consecuencia de los procesos de recolonización, y de otros que no han podido ser cubiertos totalmente por el material de desmonte.

Tabla 4.7. Cubrimiento vegetal (%) de los distintos tipos de vegetación según el sector del talud

A) TALUD SUPERIOR (T1)

	SA	SB	SC	sig. F
C. Arbórea	9.2	0.7	1.9	0.023
C. Matorral	10.6	3.2	8.7	0.105
C. Herbácea	10.4	9.5	10.7	0.933
Total	30.2	13.4	21.3	0.022

B) TALUD INFERIOR (T2)

	SA	SB	SC	sig. F
C. Arbórea	17.8	15.7	26.3	0.295
C. Matorral	17.9	22.1	23.7	0.656
C. Herbácea	20.6	17.4	15.2	0.580
Total	56.3	55.2	65.2	0.521

La dinámica de la revegetación en los taludes de las pistas estudiadas está muy condicionada por factores ambientales, principalmente los climáticos que, como es sabido, en montaña varían notablemente según la altitud y, en menor medida, según la exposición. Sin embargo, a una escala más concreta la inclinación de los taludes, el tipo de vegetación de la ladera -climácica o subserial- donde se ha abierto la pista y los procesos de erosión, que se desarrollan en los taludes, parecen determinar el porcentaje de cubrimiento vegetal. Las pistas abandonadas pueden recuperar la cubierta vegetal en toda su extensión si las condiciones ambientales son las apropiadas para ello (Foto 4.13).

En la tabla 4.8 se observa el recubrimiento vegetal de los taludes en relación con distintos grupos altitudinales. Para comprobar en qué medida existen diferencias significativas, y por lo tanto una relativa influencia del factor altura en el porcentaje de cubrimiento, se ha utilizado un análisis de varianza, admitiendo o rechazando el test de la F a partir de un nivel de significación inferior al 95%. Los datos de la tabla indican que el cubrimiento vegetal en los taludes se incrementa a medida que se eleva la altitud, y las condiciones climáticas son más frescas y húmedas, pasando de un 36.2% por debajo de los 800 m al 70.2% por encima de los 1600 m. Este incremento es muy notorio en la recolonización por parte de la vegetación arbórea, casi inexistente por debajo de los 800 m y muy representativa a partir de los 1200 m.

Tabla 4.8. Cubrimiento vegetal (%) y tipos de vegetación según la altitud en taludes de pistas forestales

	<800 m	800-1200	1200-1600	>1600	sig. F
C. Arbórea	0.3	6.8	16.5	38.7	0.000
C. Matorral	16.5	9.1	23.1	11.4	0.000
C. Herbácea	19.4	11.6	15.7	20.1	0.163
Total	36.2	27.5	55.3	70.2	0.000

La altitud no sólo determina el mayor o menor cubrimiento vegetal, sino también las especies más representativas. De hecho éstas se van sucediendo según los distintos pisos bioclimáticos por donde discurre la pista forestal. Por encima de los 1600 m el cubrimiento arbóreo de los taludes está representado por el haya *(Fagus sylvatica)* que da paso en los sectores más continentalizados al pino *(Pinus sylvestris)* (P2). Allí donde aparece el matorral las especies dominantes son los brezos *(Erica australis ssp. aragonensis)* escobas y la brecina *(Calluna vulgaris)* (P1 y P2). En los tramos de pistas forestales por encima de los 1800 m (P2) los taludes aparecen recolonizados por brezales de *Erica aragonensis,* brecina, enebrales rastreros *(Juniperus nana)* o piornos *(Cytisus purgans)*.

Entre los 800 y 1600 m se encuentran la mayor parte de los trazados de las pistas forestales que se están analizando. En esta amplia franja altitudinal los árboles más representativos en los taludes son el quejigo *(Quercus faginea),* en suelos calizos y altitudes bajas, el roble *(Quercus pyrenaica),* sobre todo en suelos silíceos, y el haya *(Fagus sylvatica).* De las tres especies, dada su facilidad para brotar, el rebollo es el que recoloniza con más facilidad los taludes.

Los matorrales más representativos son muy variados, dependiendo del sector montañoso que se analice. En las pistas más occidentales (P1 y P2) destacan las escobas *(Genista florida),* retama *(Cytisus scoparius)* y brezo blanco *(Erica arborea),* que a mayor altitud enlazan con las comunidades de *Erica aragonensis*. A medida que se avanza hacia el este son otras las especies a reseñar. En suelos silíceos (P5, por ejemplo) predomina la jara *(Cistus laurifolius)* acompañada del cantueso *(Lavandula stoechas), Thymus mastichina, Thymus zygis* y varias rosáceas. Estas comunidades de naturaleza xerófila y heliófila poseen una gran capacidad de penetración, por lo que no es extraño verlas invadiendo no sólo los taludes, sino los bordes e incluso el interior de la calzada de la pista forestal. En substrato calizo (P4) se encuentran una serie de



Foto 4.8. Revegetación de las calles de la calzada en (P7).



Foto 4.9 Pervivencia del arbolado y revegetación completa en T2 (P2).



Foto 4.10. Cubrimiento total de la jara en T2 (P7).



Foto 4.11. Pinos jóvenes en tramo inferior de T1 (P2).



Foto 4.12. Revegetación desde el sector inferior de T1 favorecido por la caída de suelo y semillas (P7).



Foto 4.13. Vieja pista abandonada completamente recolonizada por la vegetación en Cabimonteros.

matorrales basófilos encuadrados dentro del denominado aulagar montano, con especies como *Genista hispanica* (aulagino), *Genista scorpius* (aulaga), *Lavandula latifolia* (espliego), *Thymus vulgaris* (tomillo), *Rosmarinus officinalis* (romero). También en suelos básicos sobre calizas (P3) aparece el boj *(Buxus sempervirens)* acompañado del endrino *(Prunus spinosa)*, rosal *(Rosa canina y Rosa pouzinii)*, el majuelo *(Crataegus monogyna)* y *Erica vagans.*

La exposición del talud -también indicativa indirecta de aspectos climáticos como la temperatura, insolación o precipitación- interviene en la variación espacial del cubrimiento vegetal de las pistas (tabla 4.9). Los porcentajes más elevados de cubrimiento se encuentran en sectores de pistas orientados al oeste (72.6%), es decir en las umbrías abiertas a los húmedos frentes atlánticos. Esta orientación es determinante para la cubierta arbórea y herbácea que logran tapizar el 29.6% y 25.4% de la superficie de los taludes. El matorral manifiesta una clara preferencia por los taludes meridionales (sur, suroeste y sureste), con un porcentaje de cubrimento del 21.6%. Las exposiciones más septentrionales y frías son las que más dificultan el crecimiento vegetal.

Tabla 4.9. Cubrimiento vegetal (%) y tipos de vegetación según la exposición de los taludes

	N/NW/NE	E	S/SW/SE	W	sig. F
C. Arbórea	8.8	12.5	11.5	29.6	0.028
C. Matorral	7.7	12.8	21.6	17.6	0.001
C. Herbácea	9.2	16.6	15.2	25.4	0.006
Total	25.7	41.9	48.3	72.6	0.000

El papel del factor pendiente puede observarse en la tabla 4.10. Con un nivel de significación del 98%, el porcentaje de cubierta vegetal desciende a medida que la pendiente se incrementa, pasando de un 62.9% para taludes con menos de 30º a un 32.8% para aquellos que tienen una inclinación de más de 50º. La rápida circulación del agua, el incremento de los procesos erosivos, las dificultades para enraizar las plantas son algunas de las causas que explican dificultades que encuentra la vegetación para cubrir taludes muy pendientes. No obstante, el potente y profundo aparato radicular de los árboles es más ajeno a las dificultades que la pendiente puede presentar a la colonización de los taludes.

Tabla 4.10. Cubrimiento vegetal (%) y tipos de vegetación según la pendiente de los taludes

	<30º	30-40º	40-50º	>50º	sig. F
C. Arbórea	11.3	13.6	10.2	10.6	0.836
C. Matorral	32.7	13.8	10.0	13.4	0.001
C. Herbácea	18.9	12.2	17.4	8.8	0.073
Total	62.9	39.6	37,6	32.8	0.028

Si las condiciones climáticas -indirectamente reflejadas a través de la altitud y la exposición- y la pendiente del talud parecen guardar, según los análisis estadísticos, una cierta relación con las pautas seguidas por los distintos tipos de vegetación en la recolonización de los taludes, no puede decirse lo mismo de otra variable que inicialmente debería ser más decisiva. Nos referimos a la cubierta vegetal de la ladera donde se ha trazado la pista. De hecho, sólo es significativa (al 98%) la relación existente entre las laderas con bosque y la recolonización del talud con cubierta arbórea (tabla 4.11). Dicho de otro modo, los taludes de las pistas forestales que atraviesan masas boscosas logran ser recolonizados en un 16% de su superficie por especies arbóreas. Si en la ladera se ha desarrollado el matorral sólo aparece en los taludes un 8.8% de su superficie cubierta de arbolado, y éste es inexistente en laderas con campos abandonados. También son las pistas que discurren por laderas boscosas las que consiguen un mayor nivel de cubrimiento, con un 43.5%. El árbol provoca una menor incidencia de los rayos solares en el suelo, permitiendo el crecimiento de especies umbrófilas. Es interesante indicar como las pistas inscritas en laderas con campos abandonados los porcentajes de cubrimiento de matorral y herbáceas son relativamente importantes. Esto no es de extrañar si consideramos que estos antiguos campos en la actualidad se encuentran en un lento proceso de recolonización vegetal que naturalmente afecta a los taludes de la pista.

Tabla 4.11. Cubrimiento vegetal (%) y tipos de vegetación según la vegetación de la ladera

	Bosque	Mat/herbá.	C. Abandon.	sig. F
C. Arbórea	16.0	8.8	0	0.027
C. Matorral	13.3	15.3	16.4	0.773
C. Herbácea	14.2	13.5	15.9	0.906
Total	43.5	37.6	32.3	0.408

En resumen, y según lo indicado, se podría afirmar que la recolonización vegetal de los taludes sufre importantes variaciones según un determinado número de factores. Por los datos aportados el máximo cubrimiento se obtiene en aquellas pistas que se localizan por encima de los 1600 m de altitud, con una orientación occidental, en laderas cubiertas de un bosque denso y con una inclinación del talud inferior a los 30º. También ofrecen mayores porcentajes de cubrimiento el sector superior de T1 y el inferior de T2, mientras que, el menor cubrimiento se registra en el sector medio de T1, que reúne las peores condiciones para la germinación de semillas y su supervivencia. Este sector es en el que, de realizarse labores de mantenimiento, se necesitaría una mayor dedicación, con la aplicación de distintas técnicas de siembra (hidrosiembra, siembra con mulch en seco, en hileras u hoyos) y utilizando especies de herbáceas autóctonas o incluso, la plantación de tepes o manta orgánica en casos extremos. Estas actuaciones crearían una primera cubierta para frenar la erosión y disminuir el impacto paisajístico de los taludes.

EROSIÓN EN PISTAS FORESTALES

La instalación de una pista forestal en una ladera de montaña causa cambios locales de importancia en las propiedades de los suelos y en el funcionamiento hidrogeomorfológico de las laderas (Gucinski *et al.,* 2001).

La presencia de pistas forestales incrementa la producción de sedimentos en las cuencas como resultado de los movimientos en masa del corte-talud en respuesta a precipitaciones extremas (Swanson & Dyrness, 1975; Haigh *et al.,* 1988; Wemple *et al.,* 2001) o como consecuencia del impacto de las gotas de lluvia y la turbulencia de las escorrentías superficiales (Froehlich, 1995; Ziegler *et al.,* 2001). La ruptura de la pendiente de la ladera, con la consiguiente interrupción de las escorrentías superficiales y subsuperficiales (Tague & Band, 2001), la construcción de taludes o cortes de considerable inclinación (Luce & Black, 2001), la ausencia de cubierta vegetal para proteger el suelo y la compactación de la superficie de la calzada explican la variedad e intensidad de los procesos de erosión. Altas tasas de producción de sedimentos se producen después de la construcción de una pista forestal (Megahan *et al.,* 2001), cuando ésta es transitada intensamente por vehículos de motor (Reid & Dunne, 1984) o cuando no se le aplica ningún tipo de mantenimiento.

Desde una perspectiva hidrológica, el diseño de canales de drenaje en la pista forestal facilita la velocidad de la escorrentía que alcanza muy pronto los cauces (Wemple *et al.,* 1996). En consecuencia se puede producir un rápido pico de caudal y un incremento de su volumen (Jones & Grant, 1996; Bowling & Lettenmaier, 2001).

A lo largo de este capítulo se abordará la dinámica erosiva en los distintos sectores de las pistas estudiadas: calzada **(C),** corte-talud **(T1)** y talud inferior **(T2).** Se muestra, a partir de métodos sencillos, la variedad e importancia de estos procesos. También se hará referencia a aquellas variables que parecen determinar su actividad. No se trata de establecer relaciones causa-efecto, pero sí se intentará una aproximación a la complejidad de los factores que intervienen en el desencadenamiento de procesos de erosión en pistas forestales. Se hará un especial seguimiento a los procesos ocasionados por las escorrentías superficiales y los movimientos en masa.

5.1. La erosión en la calzada de la pista

Las calzadas de las pistas forestales estudiadas se encuentran sin asfaltar[1]. No obstante, se han visto sometidas, en el momento de su construcción, e incluso con posterioridad, a distintos trabajos encaminados a que permanezcan en condiciones transitables el mayor tiempo posible. A pesar de ello, es habitual con precipitaciones intensas, dada la escasa infiltración del sector, la actividad de las escorrentías superficiales. Para paliar, en lo posible, este problema se diseñan distintos sistemas de reconducción del agua. En las pistas se construyen drenajes en las cunetas interiores, al pie del talud superior; se aplica una ligera inclinación a la calzada hacia los drenajes mencionados o hacia el talud inferior; se diseñan alcantarillas transversales cada cierto espacio; y se levantan pequeños puentes en las intersecciones con los arroyos.

5.1.1 Arroyamiento concentrado: incisiones

En las calzadas de las pistas forestales, a pesar de la aplicación de medidas de protección, suelen aparecer diferentes procesos ligados a la escorrentía superficial. Los más visibles son las incisiones (Fotos 5.1 y 5.2) que aparecen en calzadas de elevado desnivel; en aquellas que experimentan cambios bruscos de pendiente; en sectores afectados por la circulación de manantiales que tienen su origen en taludes saturados; en calzadas en las que no se han previsto sistemas de drenaje o evacuación de las aguas desde el talud superior al inferior; o en las que habiéndose previsto se obturan. Peraltes, desnivelaciones o hundimientos del terreno pueden determinar también el desarrollo de incisiones individualizadas o jerarquizadas.

En las pistas estudiadas pueden distinguirse dos tipos de incisiones: longitudinales (siguen la pendiente de la calzada de la pista) (Fotos 5.2 y 5.3) y transversales (cruzan la calzada de la pista desde el corte-talud al talud inferior o viceversa) (Fotos 5.4 y 5.5). Las primeras, como se verá más adelante, se desarrollan fácilmente ayudadas por las huellas de rodadura de los vehículos. La circulación de la escorrentía en las incisiones transversales está condicionada por las características del tramo de la pista. En aquellos tramos que se adaptan a las convexidades de la ladera (“tramos salientes”) la calzada presenta habitualmente una ligera inclinación hacia el corte-

[1] En el verano de 1994 se mejoró y asfaltó la pista de Santa Marina.

talud, dirigiendo el agua del exterior al interior de la calzada. Los tramos de las pistas



Foto 5.1. Incisión transversal en la intersección de la pista sin drenaje con un barranco (Pista Cornago-Alcarama)



Foto 5.2. Incisiones longitudinales sobre firme de zahorra fina compactada. Pista forestal de Santa Marina (Camero Viejo).



Foto 5.3. Profundas huellas de rodadura en la pista de Valgañón-Ezcaray (Sierra de la Demanda).



Foto 5.4. Incisión transversal del interior al exterior de la calzada (tramo Menárez, (Sierra de la Demanda)



Foto 5.5. Incisiones transversales en materiales arcillosos de la pista de Hoyos de Iregua (Sierra de Cebollera)

en sectores cóncavos de la ladera ("tramos entrantes") ofrecen una inclinación hacia el talud inferior, es decir del interior al exterior de la pista. Estos tramos, si además coinciden, lo que es bastante habitual, con la intersección de un barranco o arroyo son muy propensos a la formación de incisiones, lo que obliga en estos puntos a la concentración de alcantarillas o badenes que cruzan la calzada para evacuar el agua.

Tabla 5.1. Características de las incisiones en las calzadas de las pistas seleccionadas

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	Med
Profundidad media (cm)	3.7	2.2	7.2	1.6	2.1	2	2.9	2.9
Profundidad máxima (cm)	7.6	6.7	15.6	3.7	3.3	6.5	5.0	6.4
Anchura media (cm)	117	111	107	80	123	80	159	111
Longitud (m)	31.2	25.6	29.9	18.5	29.5	18.0	29.2	26.0
Densidad (m/m^2)	0.25	0.19	0.42	0.19	0.18	0.17	0.23	0.23

Los resultados obtenidos sobre los procesos de incisión en las calzadas de las pistas pueden observarse en la Tabla 5.1. La densidad de drenaje media es de 0.23 m/m^2, con una profundidad media de 2.9 cm y máxima de 6.4 cm. En algunos casos como la pista de Nieva-Gamellones (P3) estos valores son claramente superiores, pues la media de las profundidades máximas es de 15.6 cm, con una densidad de drenaje de 0.42 m/m^2. Aún así todavía se están plasmando valores medios, pues la información absoluta aporta profundidades en algunas incisiones de hasta 43 cm. La anchura media de las incisiones en el punto central de los segmentos ha sido calculada en 1.11 metros siendo máxima en Alcarama (1.59 m) y mínima en las pistas con obras más recientes de explanación y reposición de firmes.

Una buena parte de las incisiones o rigolas están muy ligadas a la intensidad de uso de la pista. Como ya se ha dicho, evolucionan normalmente a partir de las rodaduras de los vehículos, por lo que presentan una mayor anchura que profundidad y una nula o escasa jerarquización. Una vez marcada la rodadura por parte de los vehículos, el desarrollo de las incisiones puede ir acentuándose a medida que la calzada se use con más intensidad, el firme se encuentre saturado o no se realicen labores de reacondicionamiento de la calzada (Foto 5.2). Algunas de estas incisiones pueden llegar a alcanzar más de un metro de profundidad en trochas o pistas abandonadas (San Román-Luezas)**.** La directa relación entre la producción de sedimentos en las calzadas de las pistas y las distintas intensidades de uso fueron puestas de manifiesto por Reid & Dunne (1984). Con un tráfico pesado e intenso, las tasas de erosión son 7.5 veces superiores a las registradas en días de escasa o nula utilización. Si el tráfico es limitado a vehículos ligeros, las pérdidas de sedimentos descienden un 0.8% sobre el valor anteriormente indicado.

Parece también deducirse una cierta relación entre el tipo de firme y las incisiones. Las pistas con terreno natural se muestran más afectadas por el arroyamiento concentrado (Tabla 5.2). Si el firme es de grava, este material se encarga, en cierta medida, de disipar la energía de la escorrentía superficial, reducir el impacto de las gotas de lluvia y frenar los efectos de la circulación de vehículos, por lo que en las pistas con este firme la intensidad de las incisiones es menor.

Tabla. 5.2. Incisiones en la calzada de la pista y tipo de firme

Tipo de firme	Anchura inci. m	Longitud incis. m	Prof. Media cm	Prof. Máxima cm
Grava	1.0	21.5	2.7	5.5
Terreno natural	1.2	27.3	2.9	6.7

Finalmente, otros tres factores que condicionan un diferente comportamiento de las incisiones son la pendiente longitudinal de la pista, la existencia o ausencia de drenajes y la orientación del tramo de pista. En la Fig. 5.1 se pone de manifiesto, como era de esperar, que la profundidad máxima de las incisiones está relacionada positivamente con la pendiente longitudinal de la calzada (r=0.68).

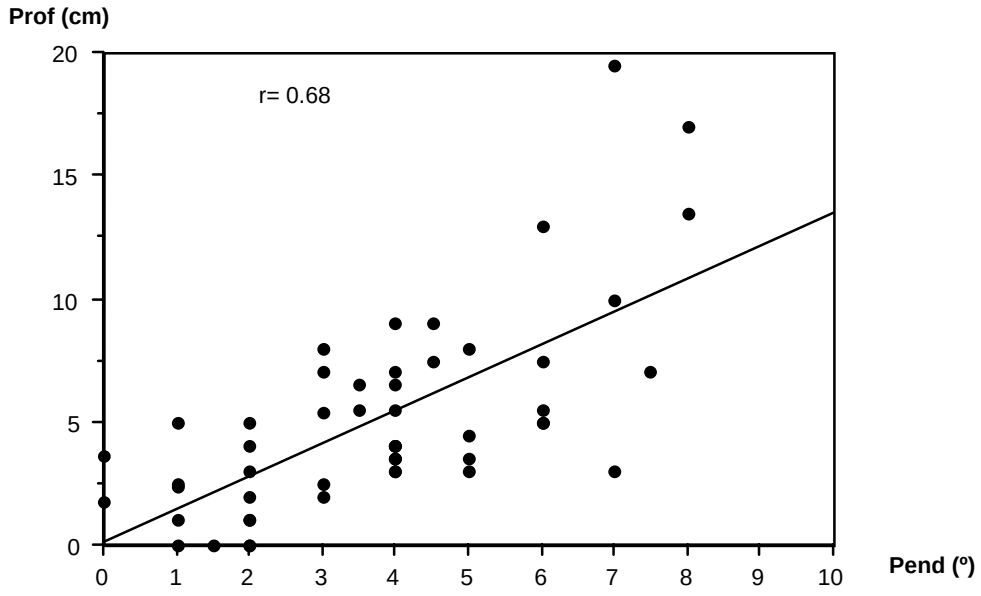


Fig. 5.1. Relación entre la pendiente longitudinal de la calzada de la pista y la profundidad máxima de las incisiones

Estas dos variables presentan un diferente comportamiento si se considera la existencia o ausencia de drenajes, la orientación del tramo de la pista y la forma de la ladera. En concreto, la pendiente de la recta de regresión (Tabla 5.3) es mayor –y, por

lo tanto, indicativa de un más rápido incremento de la profundidad de la incisión- en aquellas calzadas que no disponen de drenaje, localizadas en umbrías y en laderas rectas o cóncavas. Estos datos nos hacen pensar en una mayor disponibilidad de agua en las calzadas con dificultades para ser evacuada. La pista de Nieva-Gamellones (P3), sin cunetas ni labores de mantenimiento, sobre terreno natural y con elevadas pendientes alcanza los valores máximos en la densidad y profundidad de las incisiones (Tabla 5.1).

Tabla 5.3. Pendiente de la recta de regresión y correlaciones entre la pendiente longitudinal de la calzada de la pista (variable independiente) y la profundidad de las incisiones (variable dependiente) para determinados grupos de casos

	pendiente de la recta	r	P=
pista con drenaje	1.206	0.63	0.000
pista sin drenaje	2.147	0.92	0.000
pista en umbría	1.700	0.70	0.001
pista en solana	1.230	0.69	0.000
pista en ladera recta	1.909	0.91	0.001
pista en ladera cónca.	1.505	0.64	0.001
pista en ladera conve.	0.978	0.68	0.000

5.1.2. Impacto de gotas de lluvia ("splash") y erosión laminar

En algunas de las calzadas de las pistas forestales no se dan las condiciones favorables para la aparición de incisiones o regueros, de modo que son el impacto de las gotas de lluvia y la erosión laminar los procesos más activos. En el primero la energía de las gotas de lluvia provoca el arranque de las partículas del suelo que, posteriormente, son transportadas por el flujo de escorrentía superficial. Las pérdidas de suelo por estos procesos no son tan elevadas como las provocadas por el agua encauzada en regueros e incisiones, sin embargo sí puede ser importante su efecto acumulativo.

Para analizar el comportamiento de los procesos señalados se recurrió a la simulación de lluvia (ver el capítulo de métodos). A partir de 10 simulaciones de 30 minutos realizadas en calzadas de diferentes pistas forestales se cuantificó, por un lado, la generación y evolución de la escorrentía y, por otro, las tasas de erosión.

Las características generales de las parcelas sobre las que se llevó a cabo la simulación pueden contemplarse en la tabla 5.4. Se trata de sectores con suave gradiente (5.3º), un porcentaje de piedras del 19% y una cubierta vegetal del 29%. Se advierte que las simulaciones no se realizaron en calzadas protegidas con zahorra o grava por dos razones: la imposibilidad de introducir en estos materiales las parcelas y la creencia de que en este tipo de calzadas la energía de la gota de lluvia queda muy neutralizada. Se optó, pues, por realizar las simulaciones en calzadas de terreno natural compactado, en algunas de las cuales, dado su escaso uso, se habían desarrollado procesos de recolonización vegetal -cubierta herbácea-, en los márgenes o calles de las calzadas. Esto justificaría el porcentaje relativamente elevado de cubierta vegetal (29%). Los suelos sobre los que se llevaron a cabo las simulaciones eran limosos y con un bajo porcentaje de materia orgánica.

Tabla 5.4. Características generales de las parcelas y suelos sobre los que se realizó la simulación de lluvia en las calzadas de las pistas

	Media	Desviación
Altitud (m)	1102	199.3
Pendiente (º)	5.3	1.5
Porcentaje de piedras (%)	19	20.8
Cubierta vegetal (%)	29	25.1
Suelos-Fracción arenas (%)	38	23.5
Suelos-Fracción limos (%)	47	19
Suelos-Fracción arcillas (%)	15	7
Suelos-Materia Orgánica (%)	2.6	2.2

La figura 5.2 muestra la evolución de la escorrentía durante las pruebas de simulación. Cada punto representa el valor medio de las 10 simulaciones. La escorrentía superficial comienza a funcionar a los 366 segundos. La curva muestra un rápido incremento de la escorrentía especialmente en los momentos iniciales como resultado de la saturación, sellado y reducción de la fuerza capilar de los primeros centímetros del suelo.

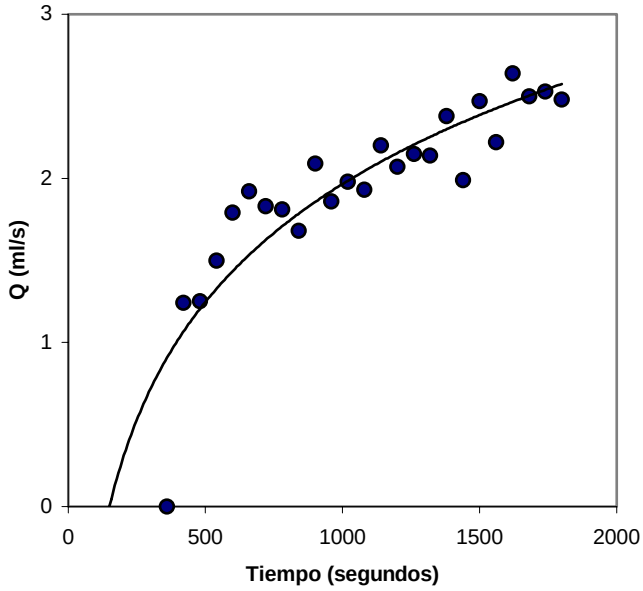


Fig. 5.2. Evolución de la escorrentía superficial en las pruebas de simulación de lluvia realizadas sobre las calzadas de las pistas forestales. $y = -5.19+2.38 \log_{10}x$, $r^2 = 0.78$, $p = 0.000$

Las parcelas arrojaron un coeficiente de escorrentía medio del 46%, aunque en algunas pruebas este coeficiente superó el 60%. El pico de escorrentía fue calculado en 2.8 ml s^{-1}. En la mayor parte de las pruebas se ha medido un delgado frente de humectación, confirmando la resistencia a la infiltración del agua. A partir de los coeficientes de correlación y p-values (tabla 5.6), se observa que en la calzada de las pistas forestales la cubierta vegetal es el control más influyente de la escorrentía, con una correlación significativa y negativa. Una densa cubierta de herbáceas reduce el impacto de las gotas de lluvia en el suelo y es indicativa de una nula o moderada intensidad de uso. El porcentaje de piedras también es importante en la generación de escorrentía. En este caso la correlación es positiva y significativa al 99%. Según Poesen *et al.* (1990) y Descroix *et al.* (2001), las escorrentías superficiales se incrementan con la presencia de gravas que, como se ha observado en las calzadas de la pista, están incrustadas en la superficie del suelo. Estas gravas reducen el valor de la conductividad hidráulica del suelo.

Tabla 5.5. Resultados hidrológicos de las simulaciones de lluvia en las calzadas de las pistas forestales

Prueba	Escorrentía (ml s^{-1})	Pico escorrentía (ml s^{-1})	Coeficiente escorrentía (%)	F. humectación (cm)
C-1	1.8	2.8	43.2	12
C-2	2.1	2.7	36.0	2.5
C-3	2.2	2.9	62.0	6
C-4	2.5	3.5	62.6	6
C-5	1.5	1.8	36.6	6
C-6	1.8	2.6	63.4	3.5
C-7	1.9	4.7	56.5	3
C-8	1.5	3.4	37.7	6.3
C-9	0.8	1.6	21.0	7
C-10	1.2	2.3	45.5	3.5
Media	1.7	2.8	46.4	5.5
Desviación	0.5	0.8	14.2	2.7

Tabla 5.6. Correlaciones y p-values entre la escorrentía y las características de las parcelas

Gradiente	No significativa
Orientación	No significativa
Cubierta piedras	r = + 0.75; p= 0.01
Cubierta vegetal	r = - 0.91; p= 0.000

En la tabla 5.7 se recogen los datos correspondientes al transporte de sedimentos en las pruebas de simulación realizadas en las calzadas. La concentración media de sedimentos en suspensión fue de 0.6 g l^{-1} y las pérdidas totales de suelo 14.2 g m^{-2}. Los valores, sin embargo, son muy variables. La prueba de simulación C7 arrojó una tasa de erosión de 22.8 g m^{-2}, con un pico de concentración de sedimentos de 6.8 g l^{-1}; la C1 y la C6 también superaron los 20 g m^{-2}. Como manifiesta la figura 5.3, las mayores pérdidas de sedimentos coinciden con porcentajes de escorrentía superiores al 50%. También son estas parcelas las que se localizaron en sectores de las calzadas con mayor gradiente y menor cubierta vegetal.

Tabla 5.7. Producción de sedimentos en las pruebas de simulación de lluvia

Prueba	Concentración de sedimentos (g l^{-1})	Pico de concentración de sedimentos (g l^{-1})	Pérdidas totales de suelo (g m^{-2})
C-1	0.9	1.6	22.5
C-2	0.5	0.9	14.6
C-3	0.4	0.7	12.5
C-4	0.4	0.6	15.2
C-5	0.4	0.6	8.6
C-6	0.8	1.5	20.8
C-7	0.9	6.8	22.8
C-8	0.4	0.7	8.2
C-9	0.6	0.8	6.9
C-10	0.6	0.8	10.1
Media	0.6	1.5	14.2
Desviación	0.2	1.9	6

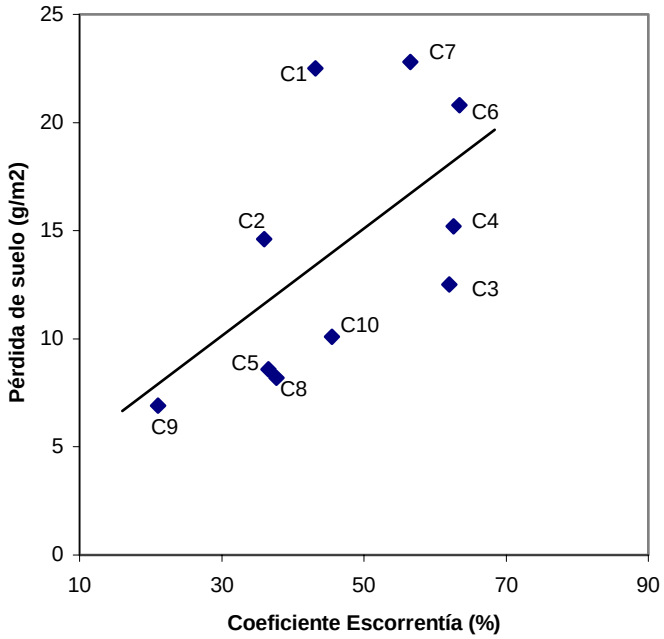


Fig. 5.3. Relaciones entre el coeficiente de escorrentía y las pérdidas de suelo en las calzadas de las pistas forestales. y= 2,70+0,24x; r^2=0,34, p=0.07

En la Fig. 5.4 se representa la evolución de la curva de concentración de sedimentos en suspensión durante la duración del experimento. De nuevo los puntos

representan los valores medios de todas las pruebas de simulación realizadas. Inicialmente se recoge una elevada concentración que decrece a medida que trascurren los minutos. Esta respuesta está relacionada con la alta disponibilidad de sedimentos en los primeros momentos en los que comienza a actuar la escorrentía. La reserva de partículas disminuye a medida que avanza la simulación. Además hay que considerar también el efecto protector de la delgada película de agua que configura la escorrentía y que reduce los efectos de arranque de partículas por el impacto de las gotas de lluvia (splash). La relación entre algunas de las características del área donde se instaló la parcela y la tasas de erosión es estadísticamente poco significativa, excepto por lo que respecta al gradiente de la calzada de la pista (Tabla 5.8).

Tabla 5.8. Correlaciones y p-values entre tasas de pérdida de suelos y características de las parcelas

Gradiente	r = +0.61; p= 0.06
Orientación	No significativa
Cubierta piedras	No significativa
Cubierta vegetal	No significativa

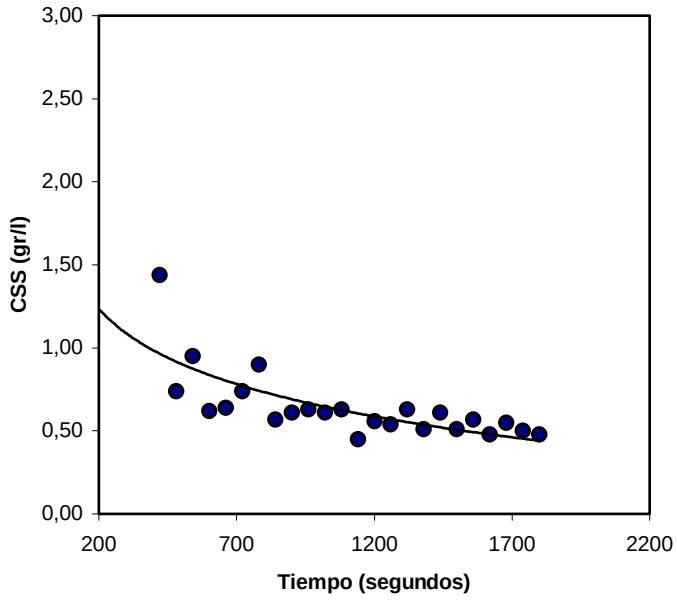


Fig. 5.4. Comportamiento de la concentración de sedimentos en suspensión (CCS) durante la simulación. $y = 3.14 + 0.83 \log_{10}x$, $r^2 = 0.55$, $p = 0.000$

Una interpretación más ajustada de los resultados expuestos se abordará en capítulos posteriores cuando se disponga de información sobre escorrentía y erosión en los otros sectores de la pista (corte-talud y talud inferior). No obstante, se puede ir concluyendo que en las calzadas de las pistas forestales de terreno natural, el impacto de las gotas de lluvia levanta las partículas más finas que sellan los poros del suelo y fijan las gravas en la matriz. El efecto de sellado, apelmazamiento e incrustamiento de las piedras se ve muy reforzado por el efecto del paso de vehículos. En estas condiciones se generan altos valores de escorrentía superficial, aunque bajas pérdidas de suelo. A conclusiones muy parecidas llegan Descroix *et al.* (2001) en laderas caracterizadas por disponer de una delgada costra superficial de 1 a 5 mm de espesor, con pequeñas gravas de menos de 20 mm incorporadas e incrustradas en la matriz.

En las calzadas de las pistas que disponen de una cubierta de zahorra o gravas finas no se han podido realizar simulaciones de lluvia por las dificultades encontradas para la instalación de la parcela experimental. No obstante, las observaciones de campo han permitido obtener interesantes conclusiones en la línea de las ya plasmadas en el apartado de las incisiones. En estos ambientes las gravas sueltas reducen las pérdidas de suelo, ya que absorben la energía cinética de las gotas de lluvia y disipan la escorrentía superficial. Estos efectos han sido puestos de manifiesto por Valentín & Bresson (1992) y Poesen & Lavee (1994).

5.1.3 Drenajes y cunetas en las pistas forestales

Las cunetas no cubren la totalidad de los recorridos de la mayoría de las pistas. Sólo las principales disponen de este tipo de obras además de drenajes transversales subterráneos. Las cunetas soportan un incremento potencial de la erosión debido al volumen y velocidad del agua evacuada.

A menudo el estado de las cunetas es deficiente debido a su colmatación por troncos, ramas, rocas y paquetes de suelo caídos desde el corte-talud superior o arrastrados por el arroyamiento laminar. Es común observar la sedimentación de finos detrás de este tipo de obstáculos. Estas presas naturales provocan desbordamientos hacia la calzada, y desde aquí el agua se encamina a través de incisiones transversales y longitudinales hacia los taludes inferiores, circulando ladera abajo hasta conectar con los fondos de barranco. En algunos casos, cuando las

precipitaciones son muy intensas provocan avenidas de agua importantes que pueden abrir profundos surcos de más de 1 m de profundidad si las litologías son deleznables.



Foto 5.6. Deslizamiento en el talud inferior ocasionado por la circulación del agua en un drenaje superficial (Pista Valgañón-Ezcaray)

Cabe destacar el hecho de que las correlaciones entre la capacidad de las cunetas y las incisiones de las calzadas son bajos, aunque siempre negativos. Especialmente interesante es la relación entre a la profundidad máxima (-0.34) y media (-0.32) de las incisiones.

Los drenajes transversales de las pistas forestales pueden ser superficiales o subterráneos. Los primeros son simples depresiones abiertas para impedir la dispersión de la escorrentía sobre la calzada. En estos casos la concentración y evacuación del agua puede dar lugar a deslizamientos o coladas mixtas de piedras y barro, como se puede constatar en la foto 5.6. Recientemente, estos drenajes transversales construidos con cemento, se han ido incrementando en diversas pistas (Ocón-Arnedillo, Valgañón-Ezcaray, Hoyos de Iregua-Puente Ra).



Foto 5.7. Construcción de drenajes transversales con trampa de sedimentos y pequeña lengua de desagüe en la pista Valgañón-Ezcaray (Sierra de la Demanda).

Los drenajes subterráneos se construyen a base de tubos de distinto diámetro en sentido transversal a la dirección de la pista. Antiguamente se construían también con secciones cuadradas o rectangulares (Pista de Hoyos). Estos drenajes han de contar con un diseño que considere tanto la entrada como la salida de caudal y sedimentos. En la entrada un foso retiene las piedras de mayor tamaño, troncos y sedimentos. El interior suele ser liso y la salida se abre en una lengua de desagüe con protecciones laterales (Foto 5.7). En otros casos los tubos se alargan más allá del talud inferior. A menudo este diseño no es completo y se producen desprendimientos en las salidas. El paso del tiempo, el desgaste del material o la desnivelación del terreno pueden destruir el tubo del drenaje e incluso, causar el hundimiento de la superficie de la calzada (Foto 5.8).

Cuando los pasos de agua coinciden con fondos de barranco o arroyos de importante caudal se aumentan los diámetros hasta alcanzar el metro o metro y medio, procurando, con diferentes técnicas, que troncos y piedras no interrumpan el paso de agua. En marzo de 1996, en la pista de Hoyos de Iregua, la fusión de la cubierta nival y las lluvias de fuerte intensidad arrastraron troncos y bloques de piedra

que cegaron el paso del río Iregua provocando su desbordamiento por encima de la calzada de la pista. Esta avenida provocó múltiples deslizamientos, el hundimiento de decenas de metros de muros de gavión e importantes coladas de barro y piedras.

En una de las campañas de trabajo de campo se realizó un recuento de los drenajes para conocer el estado y funcionalidad de los mismos. Se anotó su localización, sus dimensiones, medidas de protección y estado actual en tres pistas forestales: Valgañón-Ezcaray, Hoyos de Iregua y Ocón-Arnedillo.

Tabla 5.9. Drenajes en las tres pistas estudiadas

	Nº total	Dren. Superf.	Drenajes/ km	Reducción diámetro por sedimentos %
Valg./Ezcaray	43	4	2.7	-
Hoyos de Iregua	28	0	2.5	9.6
Ocón-Arnedillo	31	2	1.6	7.6

Tabla 5.10. Características generales de los drenajes

	Nº casos	Area med. cm^2	Desv. St.
Valg./Ezcaray	37	3142.43	1159.42
Hoyos de Iregua	26	8876.8	7137.74
Ocón-Arnedillo	29	2145.22	1222.23

En la tabla 5.9 se puede observar como el número de obras de drenaje oscila entre 1.6 y 2.7 por kilómetro. Esta variabilidad se justifica por diversas razones: la importancia de la pista desde un punto de vista del tránsito y las características de la red de barrancos que se ve obligada a cruzar la pista. Los datos ponen de manifiesto un mayor número de drenajes en las pistas más occidentales que son las que, dadas la mayor innivación y precipitaciones, disponen de mayor número de arroyos activos a lo largo del año. La última columna de la tabla indica el grado de operatividad de estos desagües que es bastante importante, pues menos de un 10% del diámetro de los tubos se encontraba ocupado por ramas, hojarasca y sedimentos de diferente

tamaño (finos y gravas). Sólo dos de los drenajes de las pistas de Hoyos de Iregua y Ocón-Arnedillo contaban con una obstrucción superior al 50 % de su sección (Foto 5.9). En general su estado de conservación parece ser aceptable.



Foto 5.8. Hundimiento del drenaje de obra por el lavado del pie del talud en Cornago-Alcarama.



Foto 5.9. Obstrucción de la entrada de un drenaje transversal por acumulación de sedimentos (Pista Ocón-Arnedillo).



Foto 5.10. Grieta alargada en el borde exterior de la calzada de la pista forestal de Santa Marina.

La tabla 5.10 explica las dimensiones de estas infraestructuras, que al igual que su número, están relacionadas con las necesidades de evacuación de agua. La pista que dispone de drenajes de mayor tamaño es Hoyos de Iregua, debido al elevado número de intersecciones con arroyos de montaña con importantes aportes de caudal. Incluso se constata un cierto incremento del tamaño de los desagües con la altitud, lo que muestra las previsiones de un mayor caudal ligado a la mayor precipitación anual e intensidad de lluvia. Aun así, en ocasiones extremas resultan insuficientes.

5.1.4. Otros procesos de erosión

Aunque más relacionados con la evolución de desprendimientos en los taludes inferiores, en los márgenes externos de las calzadas aparecen grietas de arranque (Foto 5.10). Materiales que favorecen la infiltración, fuertes pendientes, laderas cóncavas y precipitaciones abundantes explican este tipo de procesos. En otros casos la propia erosión remontante del desprendimiento del talud inferior ayuda al desarrollo de estas grietas que alarman a los usuarios de las pistas por la sensación de

inestabilidad y riesgo que trasmiten. Las grietas presentan anchuras milimétricas y, en los ejemplos más graves, logran alcanzar varios centímetros. En Santa Marina, pocos meses después de su explanación y compactación, se detectaron grietas que afectaban aproximadamente al 5% de la longitud total de la pista.

En algunas calzadas se han observado “pipes” desarrollados a partir de conductos abiertos por la vegetación o por los animales. Otros procesos detectados durante el invierno, en las calles o superficies no compactadas de zonas altas, con abundancia de limos y gravas finas, son los “pipkrakes”.

Los baches se producen en tramos llanos y firmes más o menos impermeables o mal drenados. Son agrandados por los procesos de humectación-secado, por el hielo-deshielo y por el paso de vehículos.

5.2. La erosión en los taludes de las pistas forestales

Los taludes son sectores de las pistas forestales muy propicios para la actuación de los procesos de erosión. En este trabajo se ha diferenciado la evolución geomorfológica del corte-talud superior (T1) y la del inferior (T2). Recordemos que el primero se configura al insertar la pista en la ladera, y el segundo se forma, aguas abajo de la calzada, a partir de la acumulación del derrubio suelto obtenido en la excavación.

En este apartado se realiza, primeramente, una aproximación general a los procesos de erosión que surgen en los taludes de las pistas. A partir del conocimiento y estudio de los mismos se pretende resaltar aquellos que son más activos y representativos. Seleccionados estos últimos, en una segunda fase, son analizados con cierto detalle a partir de diferentes técnicas experimentales.

5.2.1. Tipología y distribución de los procesos y formas de erosión

Una forma de catalogar la diversidad y distribución de los procesos de erosión en los taludes de las pistas forestales fue definir un conjunto de microambientes geomorfológicos, es decir sectores concretos que presentaban un funcionamiento semejante desde un punto de vista de la erosión. Los microambientes seleccionados se describen con precisión en el capítulo de métodos. En esta sección se expondrá el análisis de los resultados obtenidos.

La importancia de los microambientes geomorfológicos en los taludes de las pistas se muestra en la tabla 5.11. En el corte-talud (T1) los procesos más repetidos corresponden al grupo de los microprocesos de erosión, al ocupar el 44.1% de la longitud de los transectos. En segundo lugar, se encuentran las caídas de rocas que representan el 23.5%, seguidas de los deslizamientos, con el 16.5%, y el arroyamiento difuso severo (12.2%). El resto de los procesos tienen menor importancia, proporcionando los valores mínimos la erosión nula (0.3%), el arroyamiento difuso débil (0.4%) y las incisiones (2.4%).

En la tabla 5.12 se ha confeccionado una matriz de correlaciones entre los distintos microambientes geomorfológicos. Si bien los coeficientes no son muy altos, nos

ayudan a comprender algunos aspectos de la distribución de los procesos y formas de erosión en los cortes-taludes (T1).

Tabla 5.11. Microambientes geomorfológicos en los taludes de las pistas forestales

	T1		T2			
Microam.	m	%	m	%	t-Test	sign.
EN	0.07	0.3	4.76	23.8	5.62	0.000
ADS	2.43	12.2	5.50	27.5	2.95	0.003
ADD	0.07	0.4	1.44	7.2	2.98	0.003
IN	0.48	2.4	0.52	2.6	0.17	0.862
DES	3.30	16.5	0.78	3.9	4.60	0.000
MPR	8.82	44.1	4.32	21.6	3.84	0.000
CR	4.71	23.5	2.60	13.0	2.17	0.031

EN: erosión nula; ADS: arroyamiento difuso severo; ADD: arroyamiento difuso débil; IN: Incisiones; DES: deslizamientos; MPE: microprocesos de erosión; CR: caída de rocas.

Tabla 5.12. Correlaciones entre los distintos microambientes geomorfológicos en el corte-talud (T1)

	EN	ADS	ADD	IN	DES	MPR	CR
EN	1						
ADS	-0.11	1					
ADD	-0.04	-0.10	1				
IN	-0.10	0.21	**0.37***	1			
DES	0.04	-0.21	-0.16	-0.14	1		
MPR	0.11	**-0.40***	0.07	-0.09	-0.28	1	
CR	-0.08	-0.20	-0.01	-0.16	-0.11	**-0.63***	1

* Nivel de significación de $p \leq 0.01$

En primer lugar, las correlaciones, con significación igual o superior al 99%, corresponden a las categorías geomorfológicas de mayor representación espacial. La más alta se establece entre los microprocesos de erosión y la caída de rocas y es negativa (-0.63): a medida que en un talud se incrementan las caídas de rocas disminuyen los microprocesos de erosión. Esto es lógico, pues las condiciones en que se activan ambos procesos son totalmente contrapuestas. Mientras las caídas de rocas exigen taludes con afloramientos de substrato rocoso, los microprocesos son propios de taludes abiertos en suelos potentes o mantos de derrubios. Otra correlación también significativa y negativa se establece entre los microprocesos de erosión y el arroyamiento difuso severo (-0.40). Ambos obedecen también a mecanismos

diferentes. El arroyamiento es fruto del funcionamiento de las escorrentías superficiales; los microprocesos de erosión están más vinculados a las características de los suelos y a su contenido en humedad. Prácticamente en el límite de la significación igual o superior al 99 % se encuentra la correlación entre el arroyamiento difuso débil y las incisiones (0.37). Es interesante anotar que los procesos de arroyamiento (débil y severo) presentan unos coeficientes de correlación bajos pero positivos con la incisión.

En el talud inferior (T2) la distribución de los procesos se muestra más equilibrada (Tabla 5.11). La categoría geomorfológica dominante es el arroyamiento difuso severo que ocupa el 27.5% de la longitud de los transectos. También son importantes los microprocesos de erosión, con el 21.6%, y las caídas-movimientos de rocas (13%). A mayor distancia se encuentran el arroyamiento difuso débil (7.2%), los deslizamientos (3.9%) y las incisiones (2.6%). Es de destacar en T2 el elevado porcentaje que alcanza la erosión nula que con un 23.8% se sitúa en el segundo lugar en orden de importancia en la distribución de los microambientes geomorfológicos.

Tabla 5.13. Correlaciones entre los distintos microambientes geomorfológicos en el talud inferior (T2)

	EN	ADS	ADD	IN	DES	MPR	CR
EN	1						
ADS	**-0.50***	1					
ADD	-0.16	-0.13	1				
IN	-0.25	**0.44***	-0.05	1			
DES	-0.14	-0.17	-0.13	0.17	1		
MPR	-0.21	**-0.41***	-0.16	-0.20	0.17	1	
CR	-0.20	-0.13	-0.07	-0.25	-0.03	-0.27	1

* Nivel de significación de $p \leq 0.01$

Al igual que en T1 se ha confeccionado una tabla de correlaciones entre los microambientes para T2 (Tabla 5.13), con la intención de comprobar el comportamiento que muestran los procesos entre sí. La relación más estrecha, y negativa, se observa entre la erosión nula y el arroyamiento difuso severo (-0.50). Ambos son los microambientes de mayor representación en el talud inferior (T2) y no coincidentes. Las otras dos correlaciones, con significación igual o superior al 99%, se

establece, como en T1, entre el arroyamiento difuso severo y los microprocesos (-0.41) y el arroyamiento difuso severo y la incisión (0.44).

La utilización de una prueba estadística como el t-Test nos ha ayudado a decidir si efectivamente se da una diferente distribución e importancia de las categorías geomorfológicas en el corte-talud (T1) e inferior (T2) (Tablas 5.11 y 5.14). Considerando un nivel de significación exigente, se observa como los deslizamientos y microprocesos de erosión son más propios de T1. Por el contrario, los procesos vinculados a las escorrentías superficiales (arroyamiento difuso severo y arroyamiento difuso débil) son más relevantes en T2. Las incisiones y las caídas de rocas se encuentran indistintamente repartidas en los cortes-taludes (T1) y taludes inferiores (T2). Por último, es también necesario indicar que el t-Test correspondiente a la erosión nula es altamente significativo (0.000), con una mayor superficie ocupada en T2.

Tabla 5.14. Microambientes geomorfológicos en T1 y T2 con elevados niveles de significación según la prueba t-Test

Nivel de significación 0.000	Erosión nula Deslizamientos Microprocesos de erosión
Nivel de significación 0.003	Arroyamiento difuso severo Arroyamiento difuso débil

Tabla 5.15. Análisis Discriminante

Función	Eigenvalue	Porcentaje relativo	Correlación canónica
1	0.84	100	0.67
Wilks Lamdai	Chi cuadrado	DF	Nivel de significación
0.54	68.89	7	0.000

Correlaciones entre las funciones discriminantes y variables

Erosión nula	-0.522
Arroyamiento difuso severo	-0.289
Arroyamiento difuso débil	-0.289
Incisión	-0.010
Deslizamientos	0.465
Microprocesos	0.392
Caída de rocas	0.220

Tabla de clasificación

Grupo actual	Nº	1	2
T1	59	52 (88.1%)	7 (11.8%)
T2	59	16 (27.1%)	43 (72.8%)

La aplicación de un análisis discriminante corrobora las diferencias existentes en el funcionamiento geomorfológico de los dos taludes de las pistas (Tabla 5.15). Un sólo factor enfrenta a las variables en dos bloques opuestos (ver correlaciones entre las funciones determinantes y variables): por un lado, los procesos de erosión que incluyen movimientos de paquetes de suelo (deslizamientos y microprocesos de erosión) y, por otro, los microambientes geomorfológicos activados por la escorrentía superficial (arroyamiento difuso severo y débil). Estos dos grupos de procesos, como hemos visto, explican la evolución de los dos sectores de las pistas forestales: T1 y T2. La matriz, que relaciona los valores reales de pertenencia a T1 y T2 con los predichos por el análisis discriminante, presenta una muy buena clasificación en el corte-talud (T1). De hecho, 52 de los 59 transectos (88.1%) obedecen a las condiciones impuestas por el análisis multifactorial. En T2 el porcentaje es algo inferior, con un 72.8%. No obstante, el porcentaje de casos bien agrupados para el conjunto de los casos es de un 80.5%, un buen resultado.

La distribución e importancia de los microambientes geomorfológicos difiere en las distintas pistas estudiadas (Tabla 5.16 y Fig. 5.5). El arroyamiento difuso severo y las incisiones, indicativos de una fuerte erosión, están representados con porcentajes muy diversos. Un análisis de varianza nos da niveles de significación, para ambos procesos, de 0.000 (Tabla 5.16). Se detecta un incremento de su importancia desde la pista P1 (Valgañón-Ezcaray) a la pista P6 (Pista de Cornago-Alcarama). Esto es claro reflejo de la mayor degradación ambiental del sector montañoso oriental frente al occidental. Como hemos indicado en más de una ocasión, la mayor utilización histórica del paisaje, con fuerte deforestación y empobrecimiento de suelos, unido a unas condiciones climáticas más mediterráneas, con desencadenamiento de tormentas estivales de alta intensidad horaria, explican el importante papel de las escorrentías en las pistas más orientales.

Tabla 5.16. Los microambientes geomorfológicos en las distintas pistas forestales

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	sig.
EN	18.8	32.3	14.4	3.6	2.7	3.6	8.2	0.002
ADS	3.0	5.9	11.5	31.5	36.5	33.8	16.7	0.000
ADD	0.6	1.8	6.7	10.0	0	0.3	8.1	0.076
IN	0.2	1.8	0.5	4.4	0.5	6.7	2.3	0.000
DES	13.1	4.5	7.6	12.2	5.4	20.9	5.6	0.025
MPR	55.2	35.4	21.7	22.2	27.2	21.0	39.1	0.015
CR	8.9	16.7	37.0	15.8	26.9	13.1	19.6	0.123

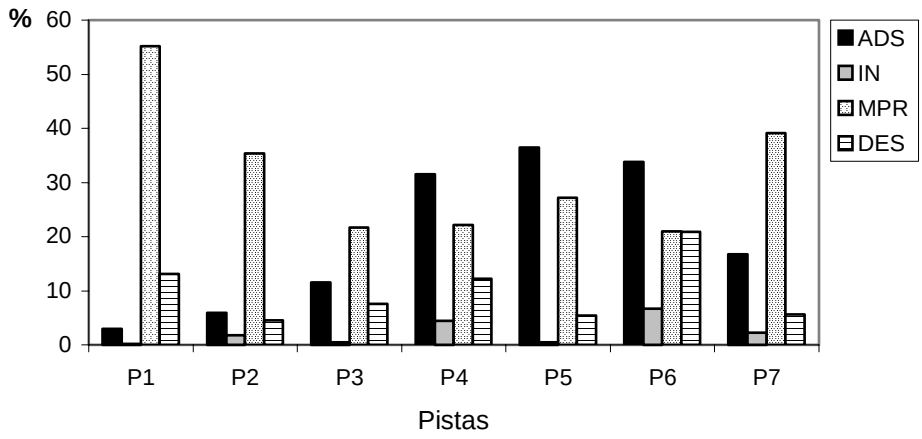


Fig. 5.5. Distribución de los microambientes geomorfológicos en los taludes de las diferentes pistas forestales estudiadas

Los microprocesos de erosión también se manifiestan con diferente incidencia en las pistas estudiadas. Su importancia disminuye de la pista P1 a la P6, del sector occidental de las sierras riojanas al oriental. Se refuerza, por lo tanto, la idea de unas mayores tasas erosivas en las pistas orientales que en las occidentales. En estas últimas lo habitual es una actividad erosiva moderada a la que contribuyen factores como la importante cubierta forestal del sector y la rápida capacidad de recolonización de los taludes.

Los deslizamientos, caída de rocas y arroyamiento difuso débil presentan una distribución más aleatoria, sin tendencias claras hacia el este o hacia el oeste de las

sierras riojanas. Los niveles de significación de las ANOVA's ya nos indican una menor diferenciación entre los grupos.

5.2.2. Factores de control en la distribución de los microambientes geomorfológicos

Una vez conocida la importancia de los distintos microambientes geomorfológicos y su distribución en los taludes, se hace necesario estudiar los factores decisivos que intervienen en su activación y evolución. Las variables consideradas han sido nueve, pudiéndose agrupar en aquellas que definen de forma directa o indirecta las características ambientales del sector por donde discurre la pista (exposición, altitud, litología y tipo de ladera), y en aquellas que nos indican las características propias de la pista forestal (pendiente de la ladera donde se inscribe, ángulo del talud, altura del talud, longitud del talud y cubrimiento vegetal). Estas variables han sido relacionadas con los microambientes geomorfológicos más destacados del corte-talud (deslizamientos y microprocesos de erosión) y del talud inferior (arroyamiento difuso severo).

A partir de un análisis de varianza (ANOVA), y descartando aquellas variables cuyo nivel de significación es inferior al 95%, se han seleccionado los factores ambientales que se muestran más decisivos en la distribución de los microambientes geomorfológicos (Tabla 5.17).

En el **corte-talud (T1)** la altitud y la exposición juegan un cierto papel en la distribución de microambientes ocupados por deslizamientos. Por lo que respecta a la primera variable, los movimientos en masa de cierta envergadura son más abundantes por debajo de los 1000 m. En las pistas forestales del Sistema Ibérico riojano el tramo más crítico se detecta normalmente en los primeros kilómetros, aquellos que conectan el fondo del valle con la media ladera o las divisorias más bajas. Es aquí, coincidiendo precisamente con las cotas entre los 700 y 1000 m, donde se diseñan, dadas las fuertes pendientes, los taludes de mayores dimensiones y más inclinados, y, por lo tanto, más propensos a los deslizamientos.

El factor orientación sería indicativo indirecto de las condiciones de humedad del suelo. Las exposiciones más septentrionales, con tasas de evaporación más bajas y

abiertas a los vientos dominantes, favorecen el mantenimiento de unos suelos con un alto contenido en agua.

En taludes con litología arcillosa se localizan los porcentajes más elevados de deslizamientos (28.7%). Estos materiales, como se sabe, poseen una alta cohesión alterable cuando importantes cantidades de agua se incorporan al suelo, aprovechando, en algunos casos las grietas de desecación. Efectivamente, tras periodos secos, el agua de unas precipitaciones intensas puede reducir la resistencia a la rotura incrementando, por un lado, el peso del material y reduciendo, por otro, la cohesión. En estas condiciones, puede alcanzarse el límite plástico, con desencadenamiento de flujos de barro (mudflow) o flujos de tierra (earthflow). Crozier (1986) comenta la posibilidad de activarse deslizamientos a partir de grietas de contracción-expansión de las arcillas. En este sentido cabe destacar la abundancia de deslizamientos detectados a lo largo de algunas de las pistas, especialmente en laderas de más de 20 y 30 grados (p=0,019).

Tabla 5.17. Factores ambientales relacionados con la distribución de deslizamientos (T1), microprocesos de erosión (T1) y arroyamiento difuso severo (T2)

		DES (T1)	MPR (T1)	ADS (T2)
Exposición	NW/N/NE	25.3%		
	E	20.2%		
	SE/S/SW	8.8%		
	W	5.7%		
	p=	0.024		
Altitud	700-1000 m	28.7%	26.7%	44.9%
	1000-1300 m	13.2%	42.4%	27.2%
	1300-1600 m	6.6%	69.5%	6.8%
	1600-1900 m	12.4%	56.7%	13.8%
	p=	0.010	0.005	0.008
Litología	Pizarras	17.9%	64.7%	6.8%
	Areniscas	7.9%	57.1%	6.1%
	Arcillas	28.7%	38.3%	48.%
	Calizas	17.9%	17.5%	29.3%
	Cuarzoarenitas	7.0%	39.0%	48.0%
	Conglomerado	5.2%	64.2%	4.0%
	p=	0.032	0.011	0.000
Tipo de vertiente	Recta		13.2%	
	Cóncava		56.0%	
	Convexa		43.2%	
	p=		0.004	

Los microprocesos de erosión están determinados por la altitud, la litología y la forma de la ladera (Tabla 5.17). La primera variable, que condiciona un mayor porcentaje de microprocesos a medida que se incrementa la altitud, es indicativa de unas bajas temperaturas. También es indicativa, junto al tipo de ladera (predominio de microprocesos en las laderas cóncavas), de mayor humedad ambiental y edáfica. En estas condiciones no es extraña la actuación de los pipkrakes o una lenta reptación del suelo (Arnáez Vadillo, 1983).

Los **cortes-taludes (T1)** de las pistas localizadas en las pizarras del Paleozoico demandino se ven afectadas en un 64.7% de su superficie por microprocesos de erosión. No se debe olvidar que estos materiales se encuentran cubiertos por un potente manto de derrubios, donde pequeños cantos se encuentran empastados en una matriz arenosa de estructura grumosa, alto grado de aireación y un importante funcionamiento de la escorrentía subsuperficial. En los taludes saturados suelen formarse con bajas temperaturas campos de pipkrakes y caídas de tepes.

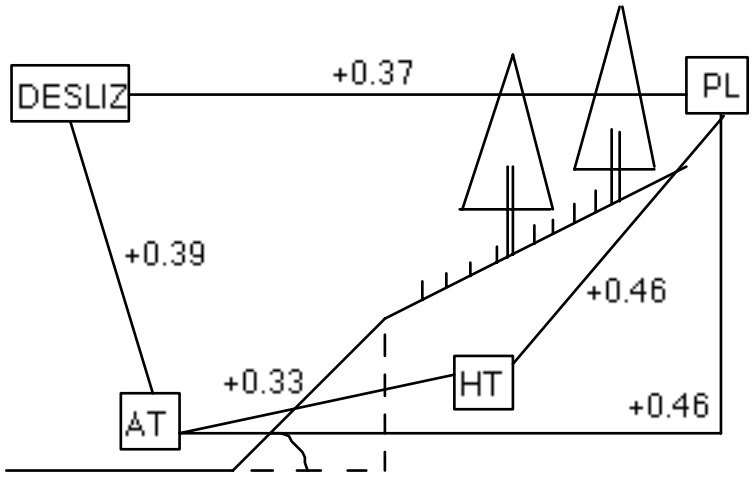


Fig. 5.6. Coeficientes de correlación entre los microambientes ocupados por deslizamientos y las características de T1. PL: pendiente de la ladera; HT: altura del corte-talud; AT: ángulo del corte-talud.

En el **talud inferior (T2)** el microambiente geomorfológico más destacado es el arroyamiento difuso severo que se manifiesta por medio de superficies desnudas, con un alto porcentaje de piedras, que quedan en resalte por el lavado del material fino, y microcanales trenzados que reconducen parcialmente la escorrentía. En la tabla 5.17,

una vez eliminados los niveles de significación inferiores al 95%, se puede observar cuáles son las áreas de localización preferentes de estos microambientes: litologías impermeables (arcillas) y altitudes bajas (<1300 m).

Las relaciones entre factores representativos de las características concretas de los taludes y los microambientes geomorfológicos han sido estudiados a partir de coeficientes de correlación. Por lo que respecta a los **cortes-taludes (T1)** afectados por deslizamientos, en la figura 5.6 se observa una relación positiva y significativa al 99% con la pendiente de la ladera (r= 0.37) y el ángulo del talud (r= 0.39). Éstos, a su vez, están también muy vinculados, demostrando, en definitiva, que una pendiente de ladera pronunciada obliga a abrir unos cortes-taludes (T1) inclinados y altos. En estas condiciones, justamente en el contacto vertiente-talud, que, como sabemos, se resuelve por medio de una ruptura, se abre una cicatriz que definitivamente evoluciona a deslizamiento. Resultados semejantes han obtenido Haigh *et al.* (1988) en pistas del Himalaya. Megahan *et al.* (2001) en Idaho, aplicando análisis de regresión en procesos sobre los cortes-taludes de pistas forestales, encontraron que la pendiente, la orientación, la densidad de la cubierta vegetal y el periodo de precipitación libre de nieve eran factores estadísticamente significativos.

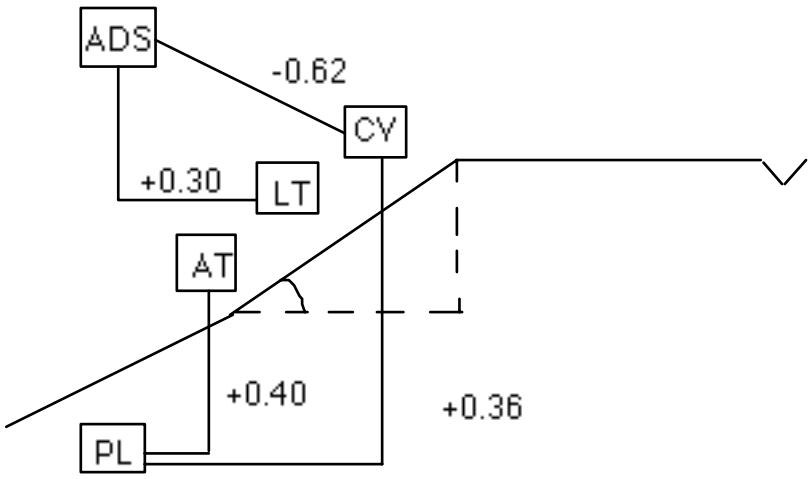


Fig. 5.7. Coeficientes de correlación entre los microambientes ocupados por arroyamiento difuso severo y las características de T2. PL: Pendiente de la ladera; AT: Angulo del talud; LT: Longitud del talud; CV: Cubierta vegetal

En la figura 5.7 se han representado los coeficientes de correlación entre las variables que definen los **taludes inferiores (T2)** y el arroyamiento difuso severo. El valor más elevado relaciona este tipo de microambientes con la cubierta vegetal y lo relaciona con signo negativo (r= -0.62). De signo contrario –positivo- es la vinculación que se establece entre el proceso y la longitud del talud (r= 0.30). En definitiva, el arroyamiento difuso severo, se distribuye más abundantemente en taludes protegidos por una escasa cubierta vegetal y con una longitud importante.

Hasta aquí se ha efectuado un análisis de las variables que con mayor o menor incidencia están presentes en la distribución de los microambientes geomorfológicos. Sin embargo, existe otro factor fundamental que explica y organiza el funcionamiento geomorfológico de la pista forestal. Nos referimos a la forma en que la escorrentía circula por la ladera alterada, en nuestro caso, por la instalación de una pista forestal.

Según los modelos clásicos (Chorley, 1978; Dunne, 1978; Dunne & Leopold, 1978), el agua en una ladera puede seguir varios caminos antes de alcanzar los cauces. En primer lugar, la escorrentía superficial hortoniana circula en superficie al excederse la capacidad de infiltración del suelo. Esta escorrentía sin canalizar o canalizada a través de pequeñas grietas, microcanales, etc. da lugar al arroyamiento difuso o laminar. Según Dunne (1978) y Dunne & Leopold (1978), la escorrentía superficial hortoniana difícilmente hace su aparición en áreas con climas húmedos, densa vegetación y suelos potentes con alta capacidad de infiltración.

El segundo tipo de escorrentía es el denominado flujo subsuperficial o agua que circula en los primeros centímetros-metros del suelo. Es propia de fuertes pendientes, con suelos profundos, permeables y cubiertos por un denso manto vegetal. La escorrentía subsuperficial en su marcha hacia el cauce tiende a concentrarse en pies de vertiente, áreas cóncavas o depresiones que se saturan rápidamente. En estas condiciones si sigue llegando agua se ve obligada a emerger a la superficie del suelo convirtiéndose en flujo superficial, denominado por Musgrave & Holtan (1964) como flujo de retorno ("return flow"). La precipitación que cae sobre estos sectores saturados tampoco puede infiltrarse pasando inmediatamente a convertirse también en escorrentía superficial. El flujo de retorno y esta última reciben conjuntamente -ya que es muy difícil su distinción- el nombre de flujo superficial de saturación (Dunne, 1978), tercer modelo de circulación del agua en la ladera.

Las pistas forestales estudiadas se localizan en laderas por las que circulan los tipos de escorrentía descritos. En las situadas en el sector más occidental (Sierra de la Demanda y Sierra de Cebollera) predomina la circulación de la escorrentía subsuperficial. Unos suelos bien estructurados, en unos casos, un manto de derrubios, en otros, y una cubierta forestal con importante aportación de materia orgánica y desarrollo radicular son razones suficientes para explicar las elevadas tasas de infiltración y circulación en los primeros centímetros-metros del suelo. La evolución temporal de este tipo de escorrentía en estos ambientes forestales fue descrita por García Ruiz & Arnáez Vadillo (1984) y Arnáez Vadillo (1987a).

En el sector más oriental de nuestra área de estudio es más importante la escorrentía superficial. Varios factores se unen para desarrollar este tipo de circulación hídrica. Por un lado, unos suelos menos permeables no sólo por las características de los materiales sino también por encontrarnos en ambientes más degradados, con ausencia de grandes masas forestales. Por otro lado, habría que mencionar las características pluviométricas del sector. En un clima de montaña con rasgos mediterráneos no son inhabituales las tormentas estivales de cierta intensidad horaria que favorecen el desarrollo de las escorrentías superficiales.

5.2.3. Impacto de las gotas de lluvia ("splash") y escorrentía superficial en los taludes de las pistas forestales

En este apartado se inicia un análisis más pormenorizado de los procesos más significativos por su dinámica y gravedad en los taludes de las pistas forestales: la erosión relacionada con la actuación del impacto de las gotas de lluvia y la escorrentía superficial, y los movimientos en masa.

5.2.3.1. Cuantificación del impacto de las gotas de lluvia y escorrentía superficial

El estudio de la erosión por impacto de las gotas de lluvia y escorrentía superficial fue llevado a cabo a partir de pruebas de simulación de lluvia. Como se pretendía conocer la actividad de estos procesos en los distintos sectores de las pistas, se efectuaron pruebas tanto en el corte-talud (T1) como en el talud inferior (T2). En el

primero se realizaron 12 simulaciones y en el segundo, 6. Las características del simulador y el proceso de trabajo pueden consultarse en el capítulo de métodos.

Las características de las parcelas sobre las que se llevó a cabo la simulación se muestran en la tabla 5.18. Las localizadas en el corte-talud (T1) tenían una pendiente media de 31.5º y las instaladas en el talud inferior, 27.5º. El porcentaje de rocas es alto, especialmente en el talud inferior (T2) (45%), que está configurado a partir del material excavado y movilizado para la construcción de la pista. La pedregosidad y el tamaño de las rocas se incrementan a medida que nos acercamos al borde inferior del talud. La cubierta forestal en T2 alcanza valores altos (40%) y está dominada por matorral (*Cistus laurifolius, Thymus vulgaris, Genista scorpius, Rosmarinus officinalis, Rosa canina*). En el corte-talud (T1), por el contrario, los suelos aparecen casi totalmente desprovistos de vegetación.

Tabla 5.18. Características generales de las parcelas y suelos sobre los que se realizó la simulación de lluvia

	T1		**T2**		
	Media	Desv.	Media	Desv.	p=
Altitud (m)	1069	192.1	966	147.7	0.268
Pendiente (º)	31.5	9.5	27.5	7.4	0.385
Porcentaje de piedras (%)	25	30	45	33.3	0.227
Cubierta vegetal (%)	5	12.3	40	32.7	0.005
Suelos-Fracción arenas (%)	30	19.5	34.4	4	0.461
Suelos-Fracción limos (%)	48	15	48.5	3.4	0.987
Suelos-Fracción arcillas (%)	22	10.5	17.0	5.2	0.184
Suelos-Materia Orgánica (%)	1.4	1.3	1.8	0.2	0.622

Las muestras de suelo, que se tomaron junto a los lugares de la simulación de lluvia, una vez analizadas, ponen de manifiesto el predominio de suelos pobres en nutrientes, con alto contenido en arcillas en los cortes-taludes (22%). El pH es alcalino con valores entre 7 y 7.5.

Un t-Test no muestra significativas diferencias entre los dos taludes por lo que respecta a sus características. Sólo pueden apuntarse marcados contrastes en la cubierta vegetal, ya que los cortes-taludes (T1) prácticamente están desnudos mientras que los taludes inferiores tienen una cubierta vegetal del 40%.

La evolución de la escorrentía en las simulaciones de lluvia puede observarse en la figura 5.8. La escorrentía superficial es casi inmediata en los cortes-taludes (T1), con un tiempo de respuesta de menos de tres minutos (172 segundos). En el talud inferior (T2) la escorrentía se activa en 334 segundos después del comienzo de la simulación. Las curvas muestran un rápido incremento de la escorrentía superficial durante los primeros minutos para inmediatamente después moderar su pendiente.

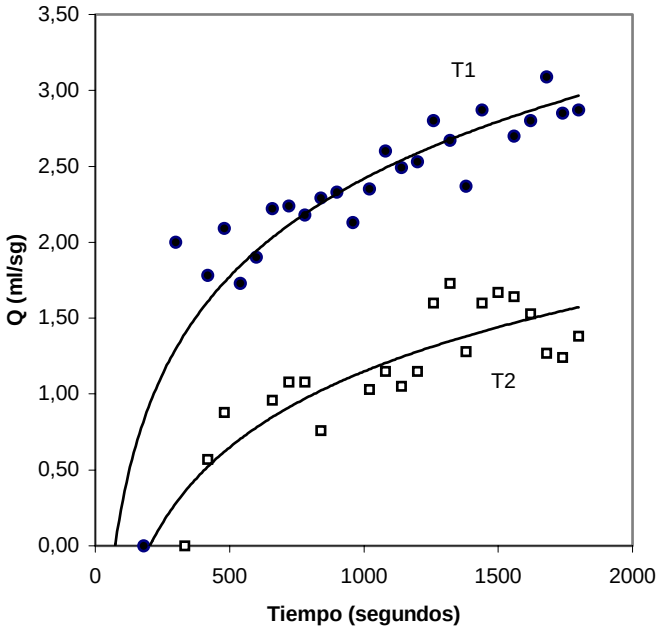


Fig. 5.8. Evolución de la escorrentía superficial en las pruebas de simulación de lluvia realizadas sobre los taludes de las pistas forestales (cada punto representa el valor medio de las simulaciones realizadas).
Corte talud (T1): $y = -4.00 + 2.14 \log_{10}x$, $r^2 = 0.80$, p value = 0.000
Talud inferior (T2): $y = -3.83 + 1.66 \log_{10}x$, $r^2 = 0.72$, p value = 0.000

Todos los valores hidrológicos son más altos en los cortes-taludes (T1) (Tabla 5.19 y 5.20). Aquí los coeficientes de escorrentía medios alcanzan el 57.8% y en algunas pruebas superan el 80% (T1-3, T1-1 y T1-9). Estos coeficientes son más moderados en los taludes inferiores (T2), con un porcentaje medio del 33.6% y máximos en torno al 40% (T2-6 y T2-1). La escorrentía superficial media fue de 1.8 ml s^{-1} en T1 (corte-talud) y 1.1 ml s^{-1} en T2 (talud inferior). Ambos taludes muestran un frente de humectación estrecho confirmando las dificultades de la infiltración en estos terrenos.

Tabla 5.19. Resultados hidrológicos de las simulaciones de lluvia en los cortes-taludes (T1) de las pistas forestales

Prueba	Escorrentía (ml s^{-1})	Pico Escorrentía (ml s^{-1})	Coeficiente escorrentía (%)	F. humectación (cm)
T1-1	2.6	4.0	86.3	2
T1-2	0.7	1.2	26.2	6
T1-3	2.5	2.9	97.7	4
T1-4	1.9	2.2	63.4	3
T1-5	0.7	1.1	18.4	10
T1-6	2.7	4.2	73.4	2
T1-7	2.8	4.0	77.4	2.5
T1-8	2.5	0.5	61.0	6
T1-9	2.8	3.8	82.1	4
T1-10	0.9	1.6	45.4	5
T1-11	0.3	0.3	9.9	10
T1-12	1.5	2.5	52.2	
Media	1.8	2.4	57.8	5.2
Desviación	0.9	1.4	28.1	2.7

Tabla 5.20. Resultados hidrológicos de las simulaciones de lluvia en los taludes inferiores (T2) de las pistas forestales

Prueba	Escorrentía (ml s^{-1})	Pico Escorrentía (ml s^{-1})	Coeficiente escorrentía (%)	F. humectación (cm)
T2-1	1.30	1.6	40.3	5
T2-2	1.44	1.9	38.6	7
T2-3	1.40	1.3	24.8	7
T2-4	0.51	0.5	16.7	25
T2-5	0.99	1.4	36.8	5
T2-6	1.22	2.1	44.3	2.5
Media	1.1	1.5	33.6	8.5
Desviación	0.3	0.5	10.5	8.2

En la tabla 5.21 se han relacionado algunas de las características de los lugares donde se realizaron las simulaciones y la escorrentía. Utilizando como referencia unos niveles de significación iguales o superiores al 95%, los factores que tienen correlaciones significativas son el gradiente y la cubierta vegetal. El primero, con unos coeficientes positivos, es sin duda el factor más determinante en el control de las

escorrentías. La cubierta vegetal en los cortes-taludes (T1) también influye en la escorrentía, con una correlación negativa (r=-0.60, p=0.05), que confirma que la escorrentía se reduce con una densa cubierta vegetal.

Tabla 5.21. Correlaciones y p-values entre la escorrentía y las características de las parcelas

Variable	Corte/Talud (T1)	Talud Inferior (T2)
Gradiente	r= +0.76; p= 0.004	r= +0.80; p= 0.05
Orientación	No significativa	No significativa
Cubierta de piedras	No significativa	No significativa
Cubierta vegetal	r= -0.60; p= 0.05	No significativa

Solamente se consideran las variables con niveles de significación de $p \leq 0.05$

Tabla 5.22. Producción de sedimentos en las pruebas de simulación de lluvia en los cortes-taludes (T1)

Prueba	Concentración de sedimentos (g l^{-1})	Pico de concentración de sedimentos (g l^{-1})	Pérdidas totales de suelo (g m^{-2})
T1-1	12.1	27.5	415.3
T1-2	1.6	2.8	16.5
T1-3	6.6	18.5	215.8
T1-4	11.1	17.3	285.4
T1-5	2.3	4.4	23.0
T1-6	7.5	12.2	273.0
T1-7	15.0	31.9	550.0
T1-8	0.9	2.11	30.6
T1-9	2.4	3.91	90.1
T1-10	0.7	1.2	8.9
T1-11	0.7	1.0	3.0
T1-12	0.8	1.5	16.7
Media	5.1	10.4	160.7
Desviación	5.1	10.9	185.3

La respuesta erosiva de las simulaciones de lluvia puede observarse en las tablas 5.22 y 5.23. Los valores más altos de nuevo se dan en los cortes-taludes (T1). La concentración media de sedimentos en suspensión es de 5.1 g l^{-1} y las pérdidas totales de suelo de 160.7 g m^{-2}. No obstante, los datos muestran una gran variabilidad: los más elevados superan los 400 g m^{-2} (T1-7 y T1-1), coincidiendo con un alto coeficiente de escorrentía (Fig. 5.9), fuertes gradientes y una escasa cubierta vegetal. Los valores mínimos son inferiores a 20 g m^{-2} (T1-2,T1-10,T1-11 y T1-12).

En el talud inferior la erosión es mucho más moderada: la concentración media de sedimentos en suspensión ha sido calculada en 0.9 g l^{-1}. El valor máximo de pérdida total de suelo es 15.1 g m^{-2} (T2-4)

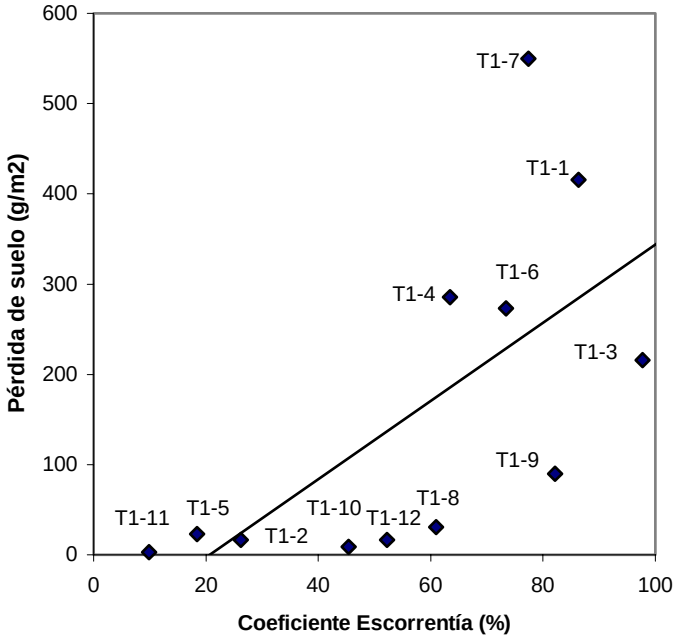


Fig. 5.9. Relación entre el coeficiente de escorrentía y las pérdidas de suelo en las simulaciones realizadas en los cortes-taludes (T1). y = 4.32x – 89.38, r^2 = 0.43

Tabla 5.23. Producción de sedimentos en las pruebas de simulación de lluvia en los taludes inferiores (T2)

Prueba	Concentración de sedimentos (g l^{-1})	Pico de concentración de sedimentos (g l^{-1})	Pérdidas totales de suelo (g m^{-2})
T2-1	0.5	1.2	9.4
T2-2	0.3	0.4	6.2
T2-3	1.0	2.0	13.6
T2-4	2.2	4.0	15.1
T2-5	0.6	0.8	8.3
T2-6	0.6	1.3	10.4
Media	0.9	1.6	10.5
Desviación	0.6	1.2	3.3

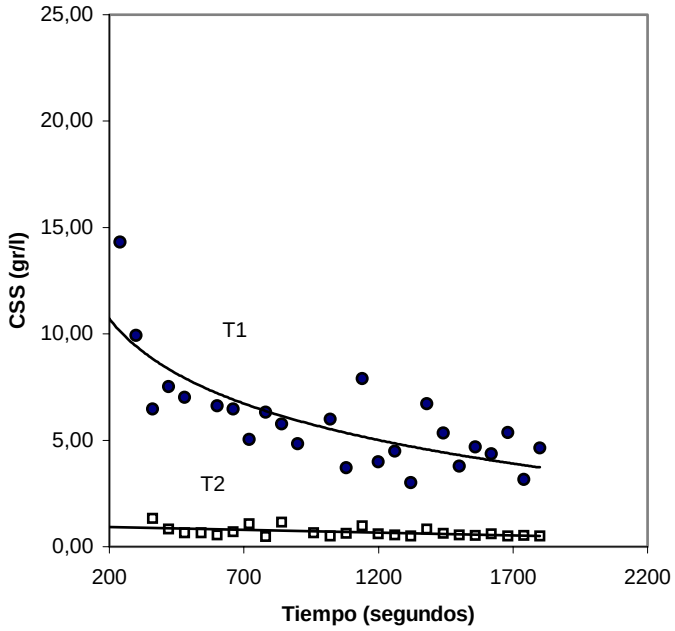


Fig. 5.10. Concentración de sedimentos en suspensión (CSS) durante la simulación de lluvia en T1 (corte-talud) y T2 (talud inferior). Los puntos representan los valores medios del conjunto de simulaciones. T1: $y = 27.53 - 7.31 \log_{10}x$; $r^2 = 0.60$; p value= 0.000.

T2: $y = 2.43 - 0.58 \log_{10}x$; $r^2 = 0.27$; p value= 0.008

En la figura 5.10 se dibujan las curvas logarítmicas de la concentración de sedimento tanto en los cortes-taludes (T1) como en los taludes inferiores (T2). La mayor concentración de sedimentos en suspensión se recoge al comienzo de los experimentos, especialmente en los cortes-taludes (T1), pero rápidamente decrece con el paso del tiempo. En los taludes inferiores se constata el mismo comportamiento, aunque no quede tan claramente visualizado en la figura 5.10 por verse la curva muy suavizada por los bajos valores de concentración que presenta T2 frente a T1. Estas respuestas se relacionan con la alta disponibilidad de material meteorizado en los primeros minutos, materiales que se agotan a medida que avanza el experimento.

Como se comprueba en la tabla 5.24, el gradiente es la variable con mayor influencia en la erosión de los cortes-taludes (T1). La relación entre tasas de pérdida de suelo y el gradiente es positiva y significativa al 98%. La erosión está influenciada

por la cubierta de piedras en los taludes inferiores (T2), con un coeficiente de correlación de 0.76 (p= 0.07)

Tabla 5.24. Correlaciones y p-values entre las tasas de pérdida de suelos y las características de las parcelas

Variable	Corte-Talud (T1)	Talud Inferior (T2)
Gradiente	r= +0.65; p= 0.02	No significativa
Orientación	No significativa	No significativa
Cubierta de piedras	No significativa	No significativa
Cubierta vegetal	No significativa	No significativa

Solamente se consideran las variables con niveles de significación de $p \leq 0.05$

Como conclusión de los datos aportados, y a la espera de una interpretación más global en el capítulo de discusión, se puede señalar que las parcelas en los cortes-taludes aportan valores altos tanto por lo que respecta a las escorrentías como a la producción de sedimentos. La fuerte pendiente de estos taludes y la falta de cubierta vegetal ayudan a la activación de estos procesos. Además estos sectores de las pistas tienen una elevada disponibilidad de sedimentos como resultado de diferentes procesos que actúan en primavera y verano y de los que se hablará en el apartado siguiente.

Las parcelas en los taludes inferiores (T2) muestran bajos valores de escorrentía y erosión. La acumulación de material suelto y envuelto en una matriz fina proveniente de la construcción de la carretera facilita la infiltración y reduce la escorrentía. El alto porcentaje de cubierta vegetal también reduce el papel del impacto de las gotas de lluvia (splash).

5.2.3.2. Comportamiento temporal de la escorrentía superficial

Las simulaciones de lluvia se llevaron a cabo a lo largo del verano para poder disponer de suelos con escasa o nula humedad. Se trataba de repetir las condiciones previas a las tormentas otoñales. Sin embargo, también era necesario contar con información sobre los efectos del impacto de las gotas de lluvia y de la escorrentía superficial a lo largo de las distintas estaciones del año. Para ello se instalaron pequeñas parcelas con clavos de erosión que funcionaron a lo largo de cuatro años

(1992-95). Una descripción de la técnica así como de la ejecución del experimento puede consultarse en el capítulo de métodos.

Recordemos, no obstante, que en la pista forestal de Santa Marina se diseñaron dos estaciones de control: una retícula de 12 m^2 (PT2A) y otra de 6 m^2 en el talud inferior (PT2B). De forma complementaria se colocaron dos líneas de clavos: en una rigola (RT1) y en un espacio entre rigolas (IT1) (Tabla 5.25).

Tabla 5.25. Características de los sectores donde se instalaron las agujas de erosión

	PT2A	PT2B	RT1	IT1
Superficie	12m^2	6m^2		
Altitud	790 m	915 m	1020 m	1020 m
Orientación	E	W	E	E
Pendiente del talud	36º	35º	39º	45º
Longitud del talud	14.1 m	4 m	5.70 m	5.20 m
Vegetación	Nula	Nula	Nula	Nula

PT2A: Parcela A del talud inferior; PT2B: Parcela B del talud inferior; RT1: Rigola del talud superior; IT1: Interrigola del talud superior.

La pista de Santa Marina presentaba características generales que se repiten en el conjunto de las pistas riojanas (Tabla 5.26). Además, tras el estudio de los microambientes geomorfológicos, se había detectado el predominio de las escorrentías superficiales en el corte-talud (T1) y en el talud inferior (T2). En el primero un 26% de la superficie muestreada estaba dominada por formas propias de la escorrentía superficial. Este porcentaje se incrementaba hasta el 48% en los taludes inferiores.

Tabla 5.26. Algunas características de la pista de Santa Marina

Variables	Corte-Talud (T1)	Talud inferior (T2)
Pendiente de las laderas	14.5º	16.6º
Angulo del talud	34.8º	32º
Altura del talud	1.69 m	2.67 m
Longitud del talud	2.93 m	4.80 m
Cubierta vegetal	1%	18.7%

Los resultados obtenidos con los clavos de erosión muestran una gran variabilidad interanual, estacional y entre los distintos taludes de la pista. Las variaciones anuales pueden apreciarse en la tabla 5.27. Los valores medios anuales son negativos (erosión) en los años más húmedos (1992 y 1993). No obstante la serie es excesivamente breve como para establecer conclusiones o interpretaciones.

Tabla 5.27. Valores medios anuales (mm) en las distintas estaciones con clavos de erosión

Año	PT2A	PT2B	RT1	IT1	Ptotal	Días <0º
1992	-5.25	0.02	-7	-7.1	592.9	83
1993		3.29	-3.88	-3.3	499.8	58*
1994		6.38	4.88	-9.6	362.3	66
1995		-4.16	8.23	-2.7	430.0	52

Los valores negativos indican pérdidas de suelo (erosión) y los positivos acumulación (sedimentación)
* dato incompleto, al faltar información de los meses de noviembre y diciembre

Tabla 5.28. Valores climáticos medios en la estación meteorológica de Munilla (1992-95)

Estación	P mm	Nº días >10 mm	Nº días < 0 º	T media ºC
Invierno	57.6	1.5	49.5	5.4
Primavera	164.8	5.25	4.25	12.7
Verano	109.9	3.75	0	18.2
Otoño	138.7	3.5	14.67	8.1

En la figura 5.11 (ver también la tabla 5.29), confeccionada a partir de las medias del periodo de estudio (1992-1995), se ha reflejado el comportamiento estacional de cada una de las parcelas experimentales. También se ha incorporado la media del conjunto. Esta última presenta un balance anual favorable a la erosión frente a la sedimentación, con dos estaciones en las que predomina la movilización de material (primavera y verano) y una tercera con acumulación (invierno).

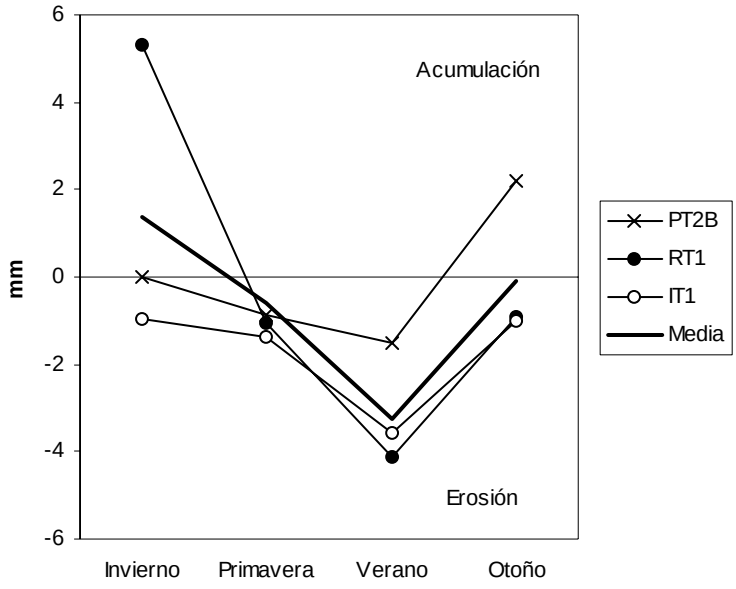


Fig. 5.11. Comportamiento estacional de las parcelas experimentales estudiadas (medias del periodo 1992-95). PT2B: arroyamiento difuso severo en el talud inferior; RT1: rigola del talud superior; IT1: interrigola del talud superior.

Los taludes de las pistas durante el invierno manifiestan preferentemente tasas de acumulación que están vinculadas a la actuación del hielo-deshielo. En concreto, se ha observado el decisivo papel de las agujas de hielo o pipkrakes en el levantamiento de partículas, primeramente, y deposición posterior. Estadísticamente esto es comprobable a través de una recta de regresión que relaciona las tasas de erosión-sedimentación con los días de heladas. Una correlación positiva (0.57) significativa al 0.02, nos indica que a medida que el número de días de heladas aumenta la acumulación de material en los taludes es más importante (Fig. 5.12). Concretamente, en el invierno de 1992 para 71 días de helada la sedimentación fue de 15.1 mm para RT1, 5.87 mm para PT2A, 4.75 mm para PT2B y 0.1 mm para IT1.

De las cuatro parcelas experimentales es la rigola la que manifiesta mayores tasas de acumulación (Foto 5.11). La configuración transversal cóncava y estrecha de la incisión facilita la retención de partículas procedentes de las áreas de interrigolas en periodos fríos (Schumm, 1956; Larrea Sáenz & Arnáez Vadillo, 1994). Contrariamente, la interrigola manifiesta en esta estación, y a lo largo del periodo de estudio, pérdidas de suelo. Esta última sería exportadora de sedimentos, la primera funcionaría como receptora.

Tabla 5.29. Comportamiento estacional de las tasas de erosión (-) y acumulación (+) en los taludes de la pista de Santa Marina (mm)

Estación/año	RT1	IT1	PT2A	PT2B
Invierno 92	+15.13	+0.1	+5.87	+4.75
Invierno 93	+6.38	-1		+0.88
Invierno 94	-0.12	-3		-2.33
Invierno 95	-0.12	0		-3.35
Media	+5.31	-0.97		-0.11
Primavera 92	-13.25	0	-0.08	+1.08
Primavera 93	-7.63	-2.10		-0.54
Primavera 94	+6.87	-3.10		
Primavera 95	+9.82	-0.30		-3.09
Media	-1.04	-1.37		-0.85
Verano 92	-9.43	-5.90	-9.73	-4.79
Verano 93	-1.63	-2.10		-1.13
Verano 94	-1.37	-4.30		-1.09
Verano 95	-4.02	-1.90		+1.00
Media	-4.11	-3.55		-1.50
Otoño 92	+0.53	-1.20	-2.28	-0.13
Otoño 93	-1.13	-0.30		+4.08
Otoño 94	-2.12	-1.50		+2.69
Media	-0.74	-1.00		+2.21

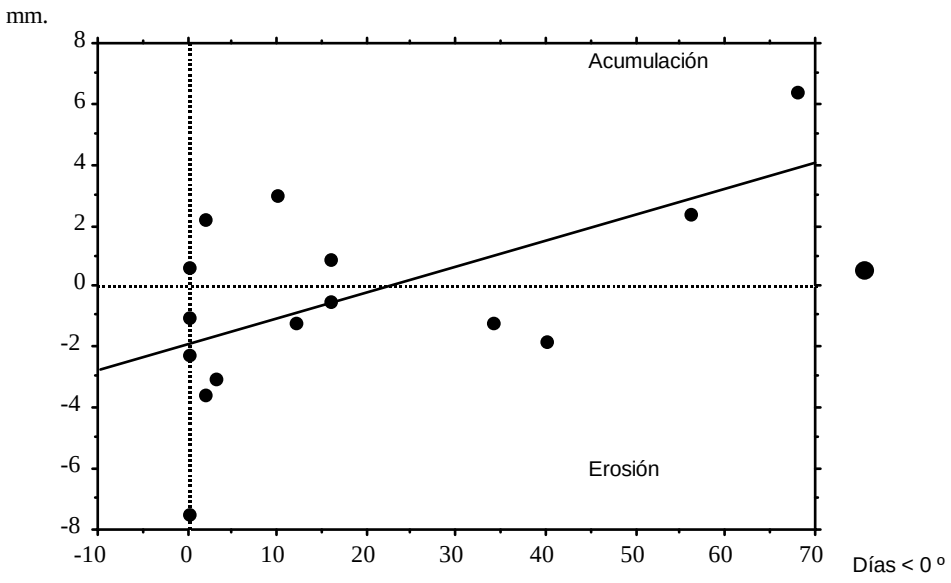


Fig. 5.12. Relaciones entre los procesos de erosión y acumulación y los días de helada
y= .09x - 1.9, r^2= .33, p= 0.02



Foto 5.11 Detalle de la acumulación de partículas y sedimentos en las rigola (RT1). Pista de Santa Marina (P5).

En primavera, el incremento de las precipitaciones (164.8 mm de media frente a los 57.6 mm del invierno) (Tabla 5.28) facilita la activación de la erosión en los taludes. No obstante, en esta estación intermedia todavía se registran algunos días de heladas que equilibran las pérdidas, sobre todo en la rigola.

En la Fig. 5.13 y 5.14 se dibujan las rectas de regresión entre los valores medidos en los clavos de la rigola, la precipitación total estacional y el número de días con precipitación superior a 10 mm. El incremento de la erosión es evidente a medida que las precipitaciones son más numerosas o más intensas. Esta afirmación puede hacerse extensiva a las restantes unidades de estudio.

A pesar de ser la primavera el periodo que registra los máximos pluviométricos, las tasas de erosión son notablemente inferiores a las del verano. Dos circunstancias explican este hecho: por un lado, el papel de las heladas primaverales como favorecedoras todavía de acumulaciones, y por otro, la escasa humedad de los suelos. Las lluvias primaverales tienen que ir lentamente recargando los suelos, reduciéndose las posibilidades de actuación de la escorrentía superficial.

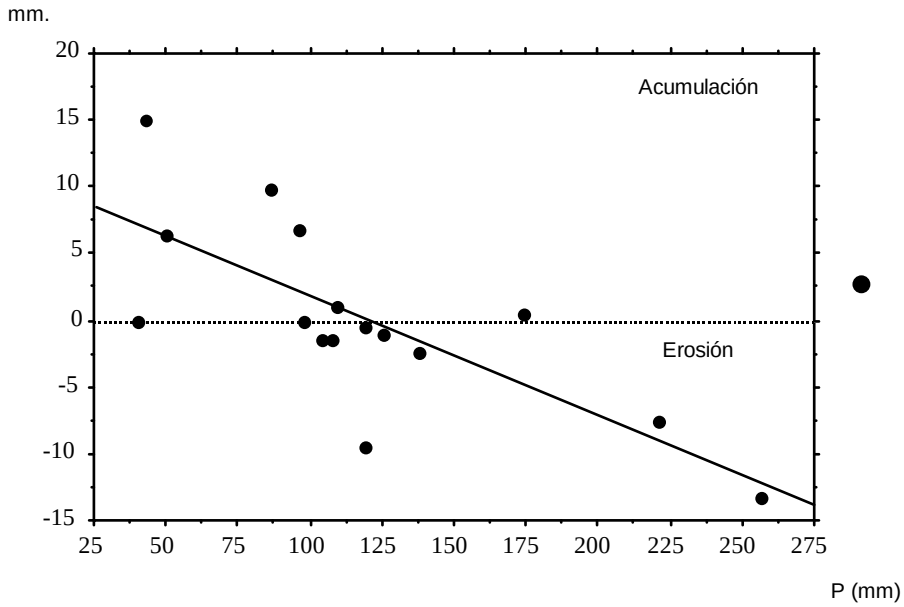


Fig. 5.13. Recta de regresión que relaciona la precipitación total estacional (mm) y la erosión-acumulación en RT1.
$y = -0.90x + 10.68$, $r^2 = 0.56$, $p = 0.005$

El verano es la estación que dispone de las tasas de erosión más altas. Además en ninguna de las parcelas se detecta sedimentación. La rigola, al encauzar las aguas, registra los valores máximos absolutos (9.44 mm en 1992) y medios (4.11 mm) mientras que en la interrigola la máxima es de 5.9 mm y la media 3,55. También en este periodo se detecta una buena correlación entre las precipitaciones y la erosión.

En el otoño vuelven a hacer su aparición las heladas (14.6 días de media) y se registran 138.7 mm de precipitación. De nuevo se detecta una alternancia entre la erosión y la sedimentación. En el conjunto de las parcelas el balance prácticamente se equilibra. No obstante, se comprueba que la acumulación es, sobre todo, importante en el talud inferior (PT2B). Su orientación occidental, más húmeda y fría, sin duda, favorece en esta estación intermedia una mayor actuación del hielo.

En resumen, el control de las tasas de erosión en los taludes de pistas forestales por medio de clavos de erosión indica que los taludes sometidos a arroyamiento difuso severo se comportan más moderadamente que aquellos que se encuentran surcados por rigolas. Observaciones recientes del área de estudio han puesto de manifiesto el desarrollo de la rigola a través de la erosión remontante, afloramiento del sustrato e incremento de su tamaño (Foto 5.12).

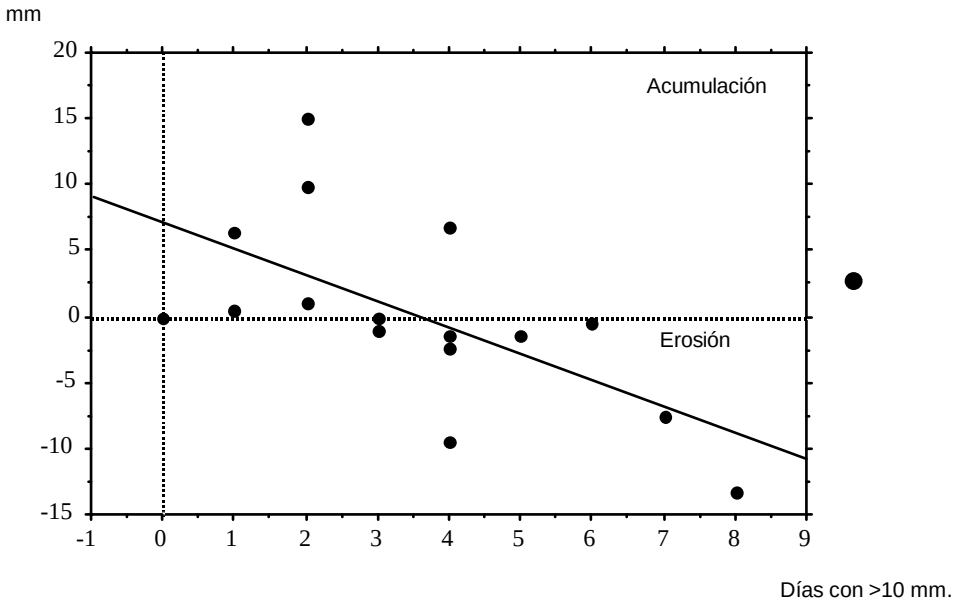


Fig. 5.14. Recta de regresión que relaciona los días con precipitación superior a 10 mm y la erosión-acumulación en RT1.
$y = -.2x + 7.15$, $r^2 = -.40$

En conjunto, las tasas son bastante bajas si se comparan los resultados con otros obtenidos mediante la misma técnica en otras áreas del mundo (Diseker & McGinnis, 1967; Haigh, 1977, 1978). Otro aspecto reseñable es el comportamiento de la erosión a lo largo del año. En invierno distintos procesos relacionados con las bajas temperaturas se encargan de levantar partículas, detectándose acumulación en determinados puntos del talud. Posteriormente, las precipitaciones primaverales y estivales erosionan y transportan el material.

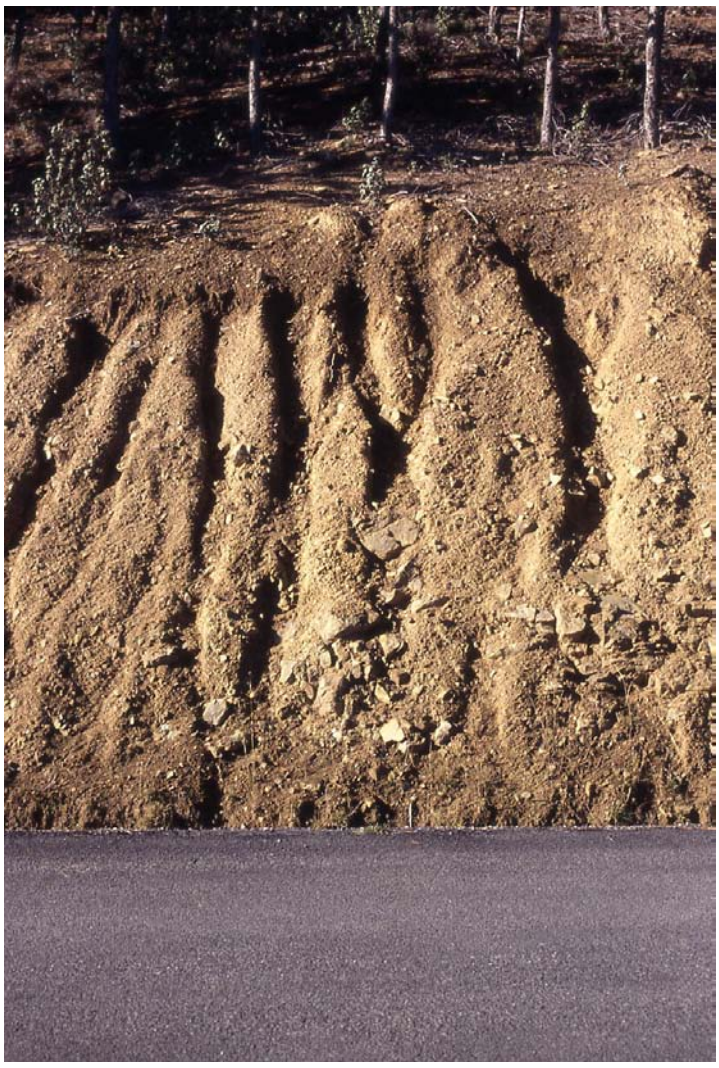


Foto 5.12. Rigolas e interrigolas en el corte-talud de Santa Marina

5.2.4. Movimientos en masa

En los taludes de las pistas forestales los movimientos en masa son, sin duda, los procesos de erosión más espectaculares y algunos de ellos se convierten en un serio obstáculo para la circulación de vehículos (Fotos 5.13 y 5.14). Además, estos procesos, al igual que los desprendimientos rocosos, obligan a labores permanentes de reacondicionamiento de calzadas que suelen encarecer el mantenimiento de estas vías de comunicación (Ayala-Carcedo, 1993). Bansal & Mathur (1976) señalan que los movimientos en masa son auténticas pesadillas en la pistas de alta montaña.

Los movimientos en masa y, especialmente, los deslizamientos en laderas han preocupado desde siempre a ingenieros y geomorfólogos disponiéndose actualmente de una amplia bibliografía sobre este tema (Haefli, 1948; Henkel & Skempton, 1954; Carson & Kirkby, 1972; Selby, 1993; Erismann y Abele, 2001). Sin embargo, los que surgen como consecuencia de o en las pistas forestales han sido abordados más recientemente. Una selección de interesantes trabajos puede hallarse en la introducción de este trabajo.

En este apartado se estudian los movimientos en masa de los taludes de tres pistas forestales del Sistema Ibérico riojano. Estos procesos pueden originarse por encima o debajo de la ladera en la que se inserta la pista o bien en los mismos taludes. Las circunstancias que favorecen la iniciación de movimientos en masa varían según el tipo de talud:

En los cortes-taludes (T1):

- La excavación realizada en el suelo o substrato rocoso para la apertura de la pista hace que el corte-talud reciba el peso de la ladera superior, reduciéndose la resistencia de los suelos.
- Se produce una ruptura de pendiente que rompe el modelo de ladera infinita modificando o condicionando en gran medida los efectos del esfuerzo normal y de la presión porosa del agua (Skempton & De Lory, 1957; Carson & Kirkby, 1972).
- La ruptura de la continuidad del suelo y de la vegetación genera una disminución brusca de la resistencia al corte o cizallamiento.



Foto 5.13. Movimiento en masa que afecta al corte-talud (T1) de una pista forestal. El material invade la calzada haciéndola intransitable



Foto 5.14. Movimiento en masa de grandes proporciones en T2 de una pista forestal. La Villa de Ocón.

- La ruptura del ciclo hidrológico de la ladera acelera el papel de las escorrentías subcorticales. Éstas provocan la sobreexcavación y ayudan a que se alcancen en los taludes los límites de plasticidad y liquidez.

En el talud inferior (T2):

- La inestabilidad también se incrementa ya que la calzada de la pista, no siempre impermeable, puede saturarse a partir de las escorrentías no evacuadas por las cunetas.
- Por otro lado, hay que sumar, al peso de las tierras movilizadas, el generado por tráfico rodado en determinadas condiciones críticas.

Los movimientos en masa, a través de la erosión remontante, incrementan la longitud y reducen el ángulo de los cortes-taludes (T1) o pueden hacer disminuir la anchura de las calzadas de la pista en el caso de desarrollarse en el talud inferior (T2). En el primer caso, también bloquean los drenajes de las cunetas impidiendo la circulación del agua y provocando el desarrollo de incisiones en la calzada y en el talud inferior.

El método de recogida de datos y las ecuaciones aplicadas para el cálculo de los volúmenes pueden encontrase en el capítulo de métodos.

5.2.4.1. Caracterización y distribución de los movimientos en masa

En la campaña de campo del verano de 2002 se realizó el estudio de los movimientos en masa en las tres pistas seleccionadas: Valgañón-Menárez-Ezcaray (P1), Hoyos de Iregua (P2) y Ocón-Arnedillo (P7) registrando un total de 135 procesos: 107 en el corte-talud (T1) y 28 en el talud inferior (T2). La selección de movimientos en masa en el talud inferior fue complicada. A partir de las cicatrices que se manifestaban en el borde externo de la calzada de la pista fueron fácilmente identificables un buen número de movimientos en masa. Algunos otros, activados en el talud inferior, y ocultos por la vegetación, es probable que quedasen sin contabilizar.

Las principales características de los movimientos en masa analizados se observan en la tabla 5.30. Se trata de procesos con una cicatriz de 3.7 metros de longitud

media, que se alargan hasta los 7.7 metros si se incluye el material movilizado. La anchura media es de 4.8 metros habiendo excavado un nicho poco profundo de 0.6 metros. La pendiente media de la cicatriz de los desprendimientos es de 49.5º.

Tabla 5.30. Características básicas de los deslizamientos

CICATRIZ

	Número	V. mínimo	V. máximo	V. medio	Desviación
Pendiente (º)	133	20	90	49.5	11.4
Longitud (m)	135	0.8	16.5	3.7	2.7
Anchura (m)	135	2	21	4.8	3.1
Profundidad (m)	135	0.17	2.2	0.6	0.3

MOVIMIENTO EN MASA

	Número	V. mínimo	V. máximo	V. medio	Desviación
Longitud total (m)	126	1.70	60	7.7	7.3

Tabla 5.31. Prueba T de Student de las diferentes características básicas de los movimientos en masa en el corte-talud (T1) e inferior (T2)

CICATRIZ

	Media T1	Media T2	T	Sig.
Pendiente (º)	52.2	40.7	5.13	0.000*
Longitud (m)	3.2	5.4	-3,77	0.000*
Anchura (m)	4.7	4.9	-0.29	0.766
Profundidad media (m)	0.6	0.5	1.77	0.079

MOVIMIENTO EN MASA

	Media T1	Media T2	T	Sig.
Longitud (m)	6.4	13.1	-4.30	0.000*

* Nivel de significación ≤ 0.05

En la tabla 5.31 se incluyen las dimensiones medias de los movimientos en masa en el corte-talud (T1) y en el talud inferior (T2). También se añaden los resultados de una prueba T para muestras independientes que permite apreciar aquellas variables con diferencias significativas a un nivel crítico de 0.05 (Sig.). Se comprueba como la cicatriz de los movimientos en masa en T2 dispone de una menor pendiente que en T1, aunque tanto la longitud de la cicatriz como la total del movimiento en masa son

superiores en relación con las mayores dimensiones del propio talud inferior. Estas diferencias tienen su explicación en la distinta naturaleza de los taludes. El corte-talud (T1) siempre tiene mayor pendiente y está formado por un material compacto limitado bruscamente por la calzada de la pista. El talud inferior (T2) dispone de una menor inclinación y de un material más suelto. Como era de esperar, no hay diferencias significativas por lo que respecta a la anchura y a la profundidad de los procesos.

En las tablas 5.32 y 5.33 se observan la distribución de los procesos estudiados y sus características más destacadas en las tres pistas seleccionadas. En la pista de Hoyos de Iregua (P2) se concentran el 46.6% del total de los movimientos en masa. Un sencillo cálculo nos indica que en esta pista se contabilizan casi 6 movimientos en masa por kilómetro. Índices inferiores han sido calculados para las pistas de Valgañón-Ezcaray (P1) (2 movimientos en masa por kilómetro) y Ocón-Arnedillo (P7) (2 movimientos en masa por kilómetro).

Tabla 5.32. Distribución general por pistas y taludes de los movimientos en masa

Pista	Nº	%	T1	%	T2	%	Km	m.m/km
P1	37	27.6	31	29.2	6	21.4	18.7	1.9
P2	63	46.6	49	45.7	14	50	10.7	5.8
P7	35	26.1	27	25.4	8	28.6	17.5	2.0
	135		107		28		46.9	2.8

La pista de Hoyos de Iregua (P2) presenta unas buenas condiciones para el desarrollo de estos procesos, pues en ella predominan, como veremos más adelante, unos materiales sueltos y poco consolidados. También es en P2 donde se detectan los movimientos en masa con longitudes (tanto de la cicatriz como del conjunto del proceso) y anchuras más destacadas.

La cicatriz de los deslizamientos muestra pendientes ligeramente más inclinadas en Ocón (P7) y en Valgañón-Ezcaray (P1). Esto es explicable, en el primer caso, por la coincidencia de los cortes-taludes con saltos de bancales agrícolas y, en el segundo, por las inclinadas laderas del estrecho valle de la cabecera del Ciloria en las que se inserta la pista. No obstante, para este caso el nivel de significación de la ANOVA es superior a 0.05. Sólo la longitud y profundidad presentan diferencias significativas entre las tres pistas.

Tabla 5.33. Características de los movimientos en masa en las tres pistas estudiadas

CICATRIZ

	P1	P2	P7	F	Sig.
Pendiente (º)	51	47.5	52.8	2.64	0.075
Longitud (m)	2.6	5	2.5	15.84	0.000*
Anchura (m)	4.6	5.4	3.9	2.80	0.64
Profundidad media (m)	0.4	0.68	0.7	7.61	0.001*

MOVIMIENTO EN MASA

	P1	P2	P7	T	Sig.
Longitud (m)	5.0	10.8	5.0	11.32	0.000*

ANOVA * Nivel de significación ≤0.05

5.2.4.2. Material movilizado

El volumen de los movimientos en masa se calculó a partir de la técnica explicada en el capítulo de métodos. El volumen medio de material desprendido por movimiento en masa ha sido calculado en 10.4 m^3, comprobándose una mayor cantidad de material movilizado en el talud inferior (T2) (15.4 m^3) que en el corte-talud (T1) (9 m^3). Estos valores confirman el pequeño tamaño de la inmensa mayoría de los movimientos detectados. No obstante, la variabilidad es muy importante, de modo que pueden encontrase desprendimientos de menos de 1 m^3 y otros por encima de los 200 m^3 (ver tabla 5.34 para observar los valores mínimos y máximos así como las desviaciones estandar). La aplicación de un T de Student confirma que por lo que respecta al volumen desprendido no existen diferencias significativas entre el corte-talud (T1) y talud inferior (T2) (Sig.= 0.232). La suma total de material movilizado en las pistas analizadas alcanzó los 1406 $m^{3,}$ es decir aproximadamente unos 30 m^3/Km.

Tabla 5.34. Volumen de material desprendido (m^3) en los casos estudiados

	Número m.m.	Vol. Mínimo	Vol. Máximo	Vol. Medio	Desv.	Vol. Total
Todos los m. en m.	135	0.16	216.7	10.4	25.0	1406.1
m. en masa en T1	107	0.16	216.7	9.09	11.5	973.2
m. en masa en T2	28	0.71	129.5	15.4	30.6	432.9

Sig. de T (t-Student): 0.232

El volumen movilizado sí presenta diferencias sustanciales entre las tres pistas analizadas (Tabla 5.35). El mayor tamaño de las cicatrices se detecta en la pista de Hoyos de Iregua (P2), con un volumen desprendido medio de 17.7 m^3. Es también en esta pista donde se encuentran los ejemplos mas espectaculares. En concreto, se ha catalogado el movimiento en masa más grande con un volumen de 216.7 m^3 (aunque en realidad es un caso que corresponde a la actividad de varias cicatrices unidas). Por último, y como cabría esperar, también en Hoyos de Iregua se ha calculado el índice más elevado de material movilizado por kilómetro: 104.3 m^3. En las pistas de Valgañón-Ezcaray (P1) y Ocón-Arnedillo (P7), por el contrario, los movimientos en masa son más pequeños. Por otro lado, es en estas pistas donde las desviaciones de los datos son más bajas evidenciado un mayor homogeneidad en cuanto a las dimensiones de estos procesos. Estadísticamente un análisis de varianza (ANOVA), con un nivel de significación de 0.006, confirma las diferencias entre las tres pistas y refuerza la especificidad de la pista de Hoyos de Iregua.

Tabla 5.35. Volumen de material desprendido (m^3) por pistas

Pista	Número m.m	Vol. Mínimo	Vol. Máximo	Vol. Media	Desv.	Vol. Total	m^3/km
P1	37	0.16	41.9	3.4	6.8	127.5	6.8
P2	63	0.18	216.7	17.7	34.6	1116.9	104.3
P7	35	0.41	34.9	4.6	6.4	161.7	9.2

Sig. de F (Anova): 0.006

Los efectos más visibles de los movimientos en masa que se activan en el corte-talud (T1) son las invasiones de las calzadas por el material movilizado, material que ciega las cunetas y ocupa un sector importante de la calzada. Los datos recogidos en el campo nos indican que en las tres pistas estudiadas aproximadamente un 3.5% de la **anchura** de la calzada se encuentra invadida por derrubios procedentes de los movimientos en masa (Tabla 5.36). Este porcentaje se duplica, como era de esperar, en el caso de la pista de Hoyos de Iregua (6.8%). No obstante, hay que advertir que esta información debe ser analizada con cierta prudencia, ya que los depósitos o rocas desprendidos que invaden la cuneta o parte de la calzada son rápidamente retirados por el personal de mantenimiento.

En el talud inferior (T2) son las cicatrices superiores de los movimientos en masa las que invaden la calzada, pero en este caso no queda bloqueada sino que se acorta por el hundimiento de la calle exterior. Visualmente las cicatrices se manifiestan por medio de arcos más o menos profundos, bien definidos, que permanecen en la pista durante más tiempo, ya que técnicamente su rehabilitación es más compleja. En las pistas estudiadas un 13.5% de la superficie de la calzada queda inutilizada por estos procesos. Para el mantenimiento de las pistas, estos hundimientos son más graves y complejos al obligar a obras de reconstrucción más costosas que las necesarias para la limpieza de los movimientos en masa de los cortes-taludes (T1).

Tabla 5.36. Porcentaje medio de calzada afectada por los movimientos en masa del corte-talud (invasión del material movilizado) y del talud inferior (hundimiento de calzada)

	Corte-talud (T1)	Talud inferior (T2)
Todas las pistas	3.5%	13.5%
Valgañón-Ezcaray		11.3%
Hoyos de Iregua	6.8%	16.8%
Ocón-Arnedillo		9.2%

5.2.4.3. Probabilidad y métodos de cálculo para los movimientos en masa

El conocimiento de los volúmenes de material desprendido en los movimientos en masa y el registro de variables como la longitud, profundidad y anchura de los nichos de arranque nos ha ayudado a avanzar en nuestro estudio. Descartando el movimiento en masa de mayores dimensiones, al estar configurado, como ya se ha señalado anteriormente, a partir de la suma de varios desprendimientos y ser claramente excepcional en nuestra área de estudio, se ha trabajado con 134 procesos que nos han facilitado:

- Información básica para conocer las probabilidades de activación de este tipo de procesos en el área de estudio. Este aspecto puede ser de interés para la planificación de mejora de pistas.
- Diseñar una función para el cálculo de volúmenes. Esto, sin duda, facilita al máximo el trabajo de campo. Disponer de una fórmula para nuestra área de estudio que calcule, con un elevado nivel de precisión, el volumen de material

desprendido puede evitar engorrosos métodos de medición.

- Conocer los factores morfométricos más influyentes en la determinación del volumen desprendido.

A partir de la técnica del cálculo de intervalo de recurrencia, ampliamente utilizada en hidrología para evaluar los periodos de retorno de diferentes avenidas o en climatología para el estudio de determinada intensidad de precipitaciones (Dunne & Leopold, 1978), se han obtenido resultados muy interesantes sobre probabilidad de activación de movimientos en masa de diferente tamaño.

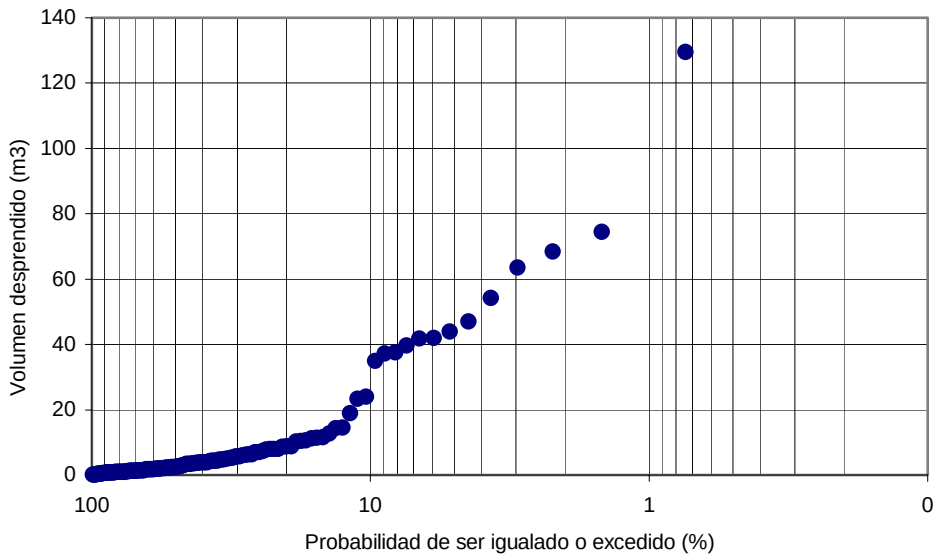


Fig. 5.15. Probabilidad de ser igualado o excedido un movimiento en masa de un determinado volumen

El método, como es sabido, calcula el periodo de retorno de un evento, es decir el número de años que, en promedio, deben transcurrir para que ese evento suceda. Este periodo de retorno se estima ordenando de mayor a menor los fenómenos, asignándoles un rango creciente y aplicando la fórmula:

$$Tr= n+1/m$$

donde *n* es el número de datos y *m* el rango del evento del cual se calcula el periodo de retorno.

El análisis del periodo de recurrencia también permite asignar a cada evento, en nuestro caso al volumen de cada movimiento en masa, una probabilidad P de ser igualada o excedida. Este dato es el que realmente nos interesa para nuestros fines y se calcula a través de:

$$P=100/Tr$$

La Fig. 5.15 muestra los resultados obtenidos en las pistas forestales del Sistema Ibérico riojano estudiadas. Existe un:

- 75% de probabilidades de activarse movimientos en masa que desplacen un volumen igual o superior a 1.1 m^3
- 50% de probabilidades de activarse movimientos en masa que desplacen un volumen igual o superior a 2.4 m^3
- 25% de probabilidades de activarse movimientos en masa que desplacen un volumen igual o superior a 7 m^3
- 10% de probabilidades de activarse movimientos en masa que desplacen un volumen igual o superior a 24 m^3
- 5% de probabilidades de activarse movimientos en masa que desplacen un volumen igual o superior a 43.8 m^3

Para construir una función que fuese capaz de calcular los volúmenes desprendidos de los movimientos en masa en el campo con fiabilidad y rapidez se ha utilizado una regresión múltiple que considera como variable dependiente el volumen desprendido y como variables independientes la longitud, la profundidad y la anchura de la cicatriz. Los valores se han transformado en sus equivalentes logarítmicos. La función resultante ha sido:

$$V\ (cm^3) = 0.31\ Lx^{0.96}\ Dx^{1.12}\ Wx^{1.07}$$

donde Lx es la longitud, Dx es la profundidad y Wx es la anchura.

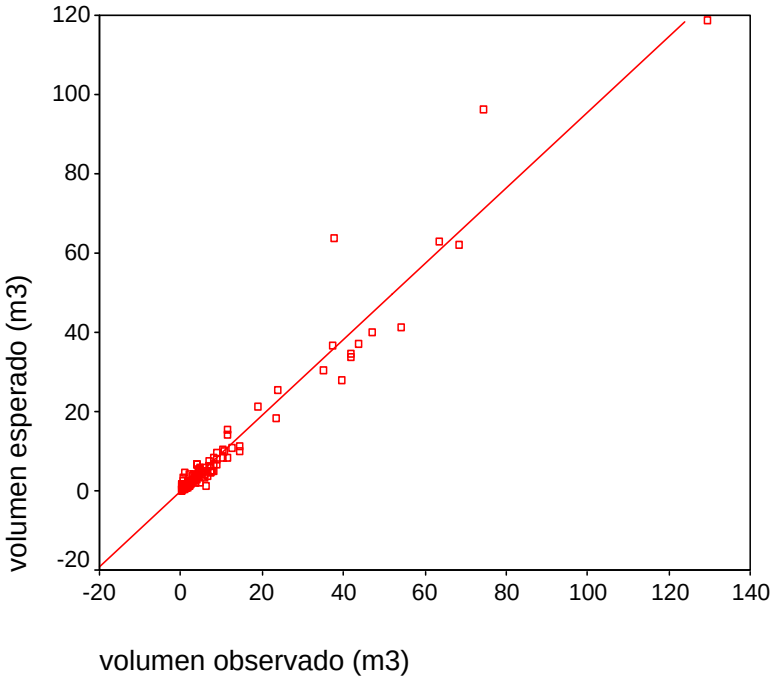


Fig. 5.16. Relación entre los volúmenes movilizados por los movimientos en masa observados y los calculados a partir de la función (y = -1,01E-02 + 0,957x; r^2 = 0.94)

La función presenta un alto nivel de significación (0.000) y un coeficiente de determinación (r^2) de 0.89. La relación entre los valores observados (volúmenes obtenidos con los datos de campo) y valores calculados (a partir de la función) es elevada (r^2: 0.94) ajustándose muy bien la recta de regresión, especialmente en los movimientos en masa de menor tamaño (Fig. 5.16).

Tabla 5.37. Coeficientes estandarizados (Beta) en la regresión múltiple

Variable independiente	Coeficiente estandarizado
Longitud	0.394
Profundidad	0.404
Anchura	0.410

El cálculo de los coeficientes estandarizados Beta en el análisis de regresión múltiple ha proporcionado información útil sobre la importancia relativa de cada una de las variables independientes en la ecuación de regresión. Ninguna tiene un peso determinante en la ecuación. La anchura cuenta con el coeficiente más alto (0.410),

aunque a muy poca distancia de las otras tres variables (Tabla 5.37).

Los resultados de los coeficientes estandarizados y el calculo de los coeficientes de determinación de las variables independientes tomadas individualmente (r^2 = de 0.53 a 0.64) nos desaniman a aconsejar la aplicación de una sola de las variables para la predicción del volumen de los movimientos en masa tal y como planteó Haigh (1984a). Sin duda, esto hubiese sido de gran utilidad para facilitar el trabajo de campo y avanzar rápidamente en la estimación de la movilización de materiales. Con menor tiempo y esfuerzo podría haberse estimado con exactitud los volúmenes de los movimientos en masa, incluso a partir de la observación de ortoimágenes aéreas.

5.2.4.4. Factores de control de los movimientos en masa

Ya ha quedado demostrado en numerosos estudios que el desencadenamiento de los movimientos en masa, así como sus dimensiones, están condicionados por todo un conjunto de factores de carácter topográfico y ambiental. En pistas forestales, para explicar la actividad de estos procesos se ha hecho referencia a la dinámica del agua en la ladera tras la fusión de las nieves o episodios de lluvias torrenciales, a las vibraciones o movimientos sísmicos, al sobrepeso de losas o grandes bloques de rocas, al sobrepeso del tráfico rodado en condiciones críticas, a la saturación de suelos en pistas próximas a los fondos de barranco, a las características de la litología, etc. En las siguientes líneas se enumeran y repasan la relaciones de algunos de estos factores con los movimientos en masa de las pistas estudiadas.

Litología

La litología es un factor que influye en la resistencia de los suelos y en el comportamiento hidrogeológico de las laderas. Rasgos como su permeabilidad, fracturación, presencia de alteritas, espesor y buzamiento de los estratos, etc. pueden influir en la modificación de la estabilidad de las laderas y de los taludes de las pistas forestales (Khaire, 1975; Brunsden *et al.,* 1981; Van Westen & Terlien, 1996).

En las pistas seleccionadas esta variable se ha mostrado, a partir de un análisis de varianza (ANOVA), muy significativa (0.000), poniendo en evidencia el diferente comportamiento de los materiales. Así, y como se comprueba en la tabla 5.38, son los

materiales morrénicos que secciona la pista de Hoyos de Iregua los que generan los desprendimientos de mayor tamaño (media: 39.1 m^3). La poca consistencia de las morrenas favorece la movilidad del material (Foto 5.15). Por el contrario, son las pizarras y los conglomerados las litologías que disponen de movimientos en masa de menor tamaño. No obstante, habría que resaltar el hecho de que en algunas de las áreas estudiadas, los sustratos se encuentran cubiertos por mantos de derrubios y suelos sobre los que se inscriben las pistas y sobre los que se desencadenan principalmente los movimientos en masa.

Tabla 5.38. Material desprendido (m^3) según litologías

	N	Media m^3	Desv. típica	Mínimo m^3	Máximo m^3
Calizas	4	9.4	4.3	3.98	14.5
Areniscas	52	9.5	20.0	0.18	129.5
Margas/arcilla	33	5.3	9.8	0.32	47.0
Pizarras	29	3.9	7.6	0.16	41.9
Conglomer.	7	1.4	0.7	0.71	2.8
Morrenas	9	39.1	27.0	4.79	74.4
Total	134	8.8	17.5	0.16	129.5

ANOVA F= 8.03; Sig.= 0.000

Agua y hielo

El papel del agua es un factor clave en la seguridad de las laderas. El agua incrementa el peso del suelo a medida que éste se va saturando, así como la presión porosa; animando a la movilización de material. En un suelo muy saturado durante el invierno o la primavera, durante el periodo de fusión nival o tras lluvias de gran intensidad, se pueden activar coladas de piedra y barro (Foto 5.16).

Al no disponer de información termopluviométrica precisa por falta de estaciones meteorológicas en las pistas estudiadas, nos hemos aproximado a las condiciones de humedad y bajas temperaturas a través de indicadores indirectos: la altitud, que, como es sabido, condiciona una mayor cantidad de precipitaciones y un importante descenso térmico a medida que nos elevamos, y la exposición, que también puede ser una buena referencia de las condiciones de humedad.

Por los datos disponibles, la altitud sí parece ser un factor a tener en cuenta en la distribución y tamaño de los desprendimientos. El resultado del análisis de varianza

(ANOVA) es significativo sugiriendo que existen diferencias entre los cuatro grupos altitudinales seleccionados (tabla 5.39). Es más, podría afirmarse que existe un umbral importante en los 1300 metros. Por debajo de esta altitud los desprendimientos son de pequeño tamaño con medias que no superan los 5 m^3 de volumen mientras que por encima de los 1300 metros éstos serían de mayores dimensiones con valores medios de 13.8 m^3 para los localizados entre los 1300 y 1600 metros de altitud y 14.5 m^3 para los situados entre los 1600 y 1900 metros.

Tabla 5.39. Material desprendido (m^3) según altitud

Metros s.n.m.	N	Media m^3	Desv. típica	Mínimo m^3	Máximo m^3
700-1000	35	4.4	6.3	0.41	34.9
1000-1300	33	2.6	4.3	0.25	24.0
1300-1600	26	13.8	27.0	0.56	129.5
1600-1900	40	14.5	20.6	0.16	74.4
Total	134	8.8	17.5	0.16	129.5

ANOVA F= 4.57; Sig.= 0.004

Estos datos no son inesperados, pues por encima de los 1300 metros y especialmente por encima de los 1600 metros las precipitaciones se incrementan y, en consecuencia, el peso de los suelos aumenta por infiltración del agua. En algunos de ellos claramente saturados, se alcanzan los límites de plasticidad dando origen a diferentes tipos de movimientos en masa. También por encima de estas altitudes la fusión del manto nival en primavera satura los cortes-taludes (T1). Los periodos de mayor actividad geomorfológica en el área de estudio coinciden con la primavera, después de la fusión nival, y, en menor medida, durante el verano con precipitaciones convectivas de fuerte intensidad horaria.

Estas ideas quedan reforzadas con el estudio de los volúmenes de los movimientos en masa por exposiciones. Si bien el análisis de varianza (ANOVA) no es significativo, poniendo en evidencia que se trata de un factor que no determina diferencias entre los grupos, la tabla 5.40 muestra que son las orientaciones noroccidentales, más húmedas y abiertas a los frentes dominantes, las que registran los desprendimientos de mayor tamaño. No obstante, esta misma tabla también evidencia que el mayor número de movimientos en masa, aunque de pequeño tamaño, se detecta en orientaciones surorientales, es decir a sotavento de los vientos dominantes. Los taludes de pistas forestales localizados en laderas con esta orientación disponen de

una menor humedad pero están sometidos a fuertes contrastes térmicos que favorecen la acción hielo-deshielo en los taludes desnudos. La acción de agujas de hielo (pipkrakes) rompe la capa superficial y preparan los materiales para que se deslicen sucesivamente.

Tabla 5.40. Material desprendido (m^3) según exposición

	N	Media m^3	Desv. típica	Mínimo m^3	Máximo m^3
0-90º	31	5.9	11.0	0.16	47.0
90-180º	58	7.0	18.2	0.18	129.5
180-270º	21	9.5	12.9	0.89	41.8
270-360º	24	16.3	23.7	0.71	74.4
Total	134	8.8	17.5	0.16	129.5

ANOVA F= 2.02; Sig.= 0.114

Topografía y relieve

Las características de la ladera también han sido consideradas a la hora de desentrañar los factores que inciden en el desencadenamiento de los movimientos en masa y, sobre todo, en el tamaño de los mismos. Las tablas 5.41, 5.42 y 5.43 indican los volúmenes de material desprendido en los movimientos en masa según la inclinación (pendiente), forma y sector de las laderas. Ninguno de estos tres factores se ha mostrado estadísticamente determinante. Las ANOVAS calculadas no establecen diferencias entre los grupos.

No obstante, la lectura de estas tres tablas, realizada de forma conjunta, indica que los movimientos en masa se activan y sus dimensiones son de mayor tamaño en pistas forestales que discurren por laderas pronunciadas (superiores a los 20º), con formas cóncavas y convexas. También los mayores movimientos en masa se detectan en los sectores bajos de las laderas (ver la columna de valores máximos en la tabla 5.43). Todo esto no es de extrañar, pues, en las laderas cóncavas y pies de laderas tiende a acumularse el agua por elevación del nivel freático. En las laderas bajas, próximas a los arroyos y ríos, la saturación se alcanza fácilmente y los sectores de los taludes se desplazan al alcanzar los límites de plasticidad. Las fuertes pendientes obligan a la construcción de taludes más inclinados y altos (Foto 5.17).

Tabla 5.41. Material desprendido (m^3) según pendiente de la ladera

Pendiente	N	Media m^3	Desv. típica	Mínimo m^3	Máximo m^3
0-20º	28	4.2	6.7	0.25	34.9
20-30º	60	8.6	18.7	0.56	129.5
30-40º	46	11.9	19.9	0.16	74.4
Total	134	8.8	17.5	0.16	129.5

ANOVA F= 1.73; Sig.= 0.181

Tabla 5.42. Material desprendido (m^3) según forma de la ladera

	N	Media m^3	Desv. típica	Mínimo m^3	Máximo m^3
Convexo	61	8.3	18.9	0.18	129.5
Recta	18	3.4	2.5	0.83	10.4
Cóncavo	55	11.2	18.4	0.16	74.4
Total	134	8.8	17.5	0.16	129.5

ANOVA F= 1.39; Sig.= 0.253

Tabla 5.43. Material desprendido (m^3) según sector de la ladera

	N	Media m^3	Desv. típica	Mínimo m^3	Máximo m^3
L. baja	63	6.4	16.9	0.32	129.5
L. media	43	13.5	20.7	0.25	74.4
L. alta	28	7.0	11.6	0.16	41.9
Total	134	8.8	17.5	0.16	129.5

ANOVA F= 2.33; Sig.= 0.100



Foto 5.15. Inestabilidad del corte-talud abierto en materiales morrénicos. Pista de Hoyos de Iregua.



Foto 5.16. Colada de barro y bloques en Torrecilla. Primavera de 2003.



Foto 5.17. Taludes de pistas forestales inclinados y desnudos en ladera de fuerte pendiente (Pazuengos).



Foto 5.18. Caídas de rocas en un corte-talud (T1) abierto en substrato rocoso (San Lorenzo).



Foto 5.19. Pista forestal con movimientos en masa en taludes con una importante cubierta vegetal de matorral y árboles (Villar de Poyales).

Foto 5.20. Zona crítica en Hoyos de Iregua. La pista secciona acumulaciones de material morrénico y presenta un corte-talud (T1) afectado por un buen número de movimientos en masa.





Foto 5.21. Hundimientos de los gaviones como consecuencia de diferentes movimientos en masa en el corte-talud de Hoyos de Iregua. Estos fueron acompañados de coladas de barro y piedra en el talud inferior, tras persistentes e importantes precipitaciones del invierno y primavera en 1996.

El diseño de los cortes o taludes

Las dimensiones (altura y longitud) y la inclinación del talud de la pista forestal se muestran determinantes a la hora de establecer diferencias entre los distintos grupos seleccionados. A partir de la ANOVA puede concluirse que existe una relación entre el volumen desprendido y la mayor dimensión (altura y longitud) del talud. Por encima de los 8 metros de longitud el material desprendido es de 34.3 m^3 de media (tabla 5.44). Si se considera la altura del talud, más de 6 metros favorecen movimientos en masa que han llegado a movilizar una media de 58.2 m^3 de material (tabla 5.45).

La inclinación del talud es significativa, pero aporta resultados inversos: el tamaño de los movimientos en masa se incrementa en taludes menos pendientes (tabla 5.46). Este resultado no debe sorprender, pues, superada determinada inclinación los taludes suelen evolucionar a partir de otro tipo de procesos, especialmente caída de rocas, allí donde hay afloramientos rocosos, o caídas de tepes (Foto 5.18).

Tabla 5.44. Material desprendido (m^3) según la longitud del talud

	N	Media m^3	Desv. típica	Mínimo m^3	Máximo m^3
< 2 m	5	1.1	0.8	0.32	2.0
2-4 m	47	3.5	6.2	0.21	34.9
4-6 m	51	6.1	9.6	0.16	54.1
6-8 m	14	11.0	13.8	0.89	43.8
> 8 m	16	34.3	35.8	2.9	129.5
Total	133	8.9	17.5	0.16	129.5

ANOVA F= 14.13; Sig.= 0.000

Tabla 5.45. Material desprendido (m^3) según la altura del talud

	N	Media m^3	Desv. típica	Mínimo m^3	Máximo m^3
< 2 m	21	3.8	5.8	0.32	23.3
2-4 m	76	4.5	8.5	0.16	54.1
4-6 m	25	10.6	12.6	0.85	43.8
> 6 m	8	58.2	35.9	7.78	129.5
Total	130	8.9	17.7	0.16	129.5

ANOVA F= 47.44; Sig.= 0.000

Tabla 5.46. Material desprendido (m^3) según la inclinación del talud

	N	Media m^3	Desv. típica	Mínimo m^3	Máximo m^3
30-40º	29	17.2	30.6	0.84	129.5
40-50º	40	7.5	12.4	0.18	47.0
50-60º	37	5.9	10.5	0.16	54.1
>60º	26	5.3	7.3	0.21	34.9
Total	132	8.8	17.6	0.16	129.5

ANOVA F= 3.09; Sig.= 0.029

Cubierta vegetal de los taludes

La cubierta vegetal de los taludes de las pistas es otro de los factores considerado como control para el desencadenamiento de los movimientos en masa. De la tabla 5.47, que muestra el número y volumen de movimientos en masa según el tipo de cubierta vegetal, se deduce que los de mayores dimensiones se encuentran en los taludes protegidos por cubierta arbórea mientras que los más numerosos son propios del matorral. El análisis de varianza (ANOVA) indica, a través de una alta significación, que este factor debe tenerse en cuenta para diferenciar los tamaños de los movimientos en masa.

Tabla 5.47. Material desprendido (m^3) según el tipo de cubierta vegetal del talud

	N	Media m^3	Desv. típica	Mínimo m^3	Máximo m^3
Herbácea	41	5.8	9.1	0.16	41.8
Matorral	71	6.3	10.8	0.18	54.1
Árboles	22	22.7	33.9	0.56	129.5
Total	134	8.8	17.5	0.16	129.5

ANOVA F= 9.24; Sig.= 0.000

Tabla 5.48. Material desprendido (m^3) según el porcentaje de cubierta vegetal del talud

	N	Media m^3	Desv. típica	Mínimo m^3	Máximo m^3
<20 %	56	7.7	11.1	0.16	43.8
20-40 %	23	5.2	13.9	0.18	68.4
40-60 %	17	6.8	17.6	0.21	74.4
> 60%	38	13.6	25.1	0.42	129.5
Total	134	8.8	17.5	0.16	129.5

ANOVA F= 1.44; Sig.= 0.23

La presencia de árboles en los taludes es debida a dos circunstancias: o bien se trata de jóvenes ejemplares que han empezado a recolonizar el talud a partir de densos bosques existentes en las laderas donde se inscribe la pista, o bien corresponden a ejemplares que se han deslizado al talud junto con materiales procedentes de la ladera a la hora de la construcción de la pista o con posterioridad. En cualquier caso, se ha comprobado que en pendientes elevadas –tal y como se observan en los taludes de las pistas forestales- el peso del arbolado se convierte en un factor positivo en el desencadenamiento de los movimientos en masa no compensado por la capacidad de sujeción de las raíces (Selby, 1993) (Foto 5.15). Por otro lado, las masas forestales que cubren las laderas de estas zonas favorecen la rápida infiltración y el flujo subsuperficial favoreciendo el comienzo de movimientos en masa allí donde hay una ruptura de pendiente (De Ploey & Cruz, 1979).

El porcentaje de cubierta vegetal no parece tan determinante en la diferenciación de los tamaños de los desprendimientos. Así lo indica el nivel de significación del análisis de varianza (ANOVA): 0.232. No obstante, la tabla 5.48 pone de manifiesto que, cuando la densidad de cubierta vegetal es superior al 60%, los volúmenes movilizados son más importantes. Esto que inicialmente puede ser contradictorio nos lleva a dos conclusiones. En primer lugar, la recolonización vegetal de las zonas deslizadas puede ser rápida debido a la alta humedad que contienen. En segundo lugar, la dinámica de los taludes a partir de movimientos en masa es tan intensa que no encuentra suficiente freno en la cubierta vegetal del talud.

5.2.4.5. Grupos de movimientos en masa

Para una descripción más precisa de los movimientos en masa se han agrupado los casos estudiados con el objetivo de buscar tipos que reúnan características y condiciones semejantes. Para ello se ha utilizado un análisis de conglomerados o cluster, método estadístico que detecta el número óptimo de grupos a partir de un conjunto de variables. En nuestro caso las variables incorporadas al análisis han sido el volumen desprendido en el movimiento en masa (dimensión del proceso); la litología, altitud y exposición (variables ambientales); la pendiente, forma y sector de la ladera (topografía y relieve); la pendiente del talud, la altura del talud, la longitud del talud, y el tipo y porcentaje de cubierta vegetal (características de la pista).

La distinta procedencia de las variables (cualitativas y cuantitativas) obligó a un tratamiento previo de las propias variables y de los casos incorporados. Así, las variables se organizaron en categorías y los datos de cada caso se transformaron en valores nominales (ausencia-presencia). En estas condiciones el cluster que mejor rendimientos ofrece es el jerárquico, al disponer de métodos de conglomeración para datos binarios.

El dendrograma del cluster agrupó los 134 movimientos en masa en cinco conglomerados (tabla 5.49).

Tabla 5.49. Grupos obtenidos del análisis de conglomerados (cluster)

	Nº casos	
Grupo 1	12	9%
Grupo 2	31	23%
Grupo 3	24	18%
Grupo 4	52	39%
Grupo 5	15	11%
Total	134	100%

Para la descripción de los grupos se trabajó un análisis discriminante, técnica estadística capaz de informar sobre las variables que identifican a los grupos y evaluar si éstos están correctamente clasificados según los criterios manejados por el discriminante.

El análisis seleccionó 4 funciones (tabla 5.50), aunque las dos primeras acumulan el 79.9 % de la varianza.

Tabla 5.50. Autovalores del análisis discriminante

Función	Autovalor	% de varianza	% acumulado	Corr. canónica
1	23.533	47.9	47.9	0.979
2	15.679	31.9	79.9	0.970
3	5.769	11.8	91.6	0.923
4	4.109	8.4	100	0.897

La primera función, que explica el 47.9% de la varianza, diferencia claramente a los grupos de movimientos en masa 1 y 4 con relación a los grupos 2 y 5 (Fig. 5.17). Esta primera función, según la matriz de estructura (tabla 5.51), hace referencia a la altitud. En este sentido, los movimientos en masa del grupo 1 y 4 son propios de sectores bajos de ladera cubiertos de matorral. Por el contrario, los movimientos en masa agrupados en los tipos 2 y 5 se localizan en altitudes elevadas (por encima de los 1600 metros) y en sectores de las laderas altos.

La segunda función (Fig. 5.17), que explica el 31.9% de la varianza, diferencia a los grupos 1, 4, 2 y 5 del grupo 3. Esta función selecciona a aquellos movimientos en masa que se activan en pistas forestales inscritas en laderas suaves, a baja altitud y en materiales arcillosos.

La tabla 5.52 indica que el 99,3% de los casos agrupados por el cluster están correctamente clasificados a partir de los criterios manejados por el análisis discriminante. Este porcentaje es del 100% en los grupos 1, 3, 4 y 5.

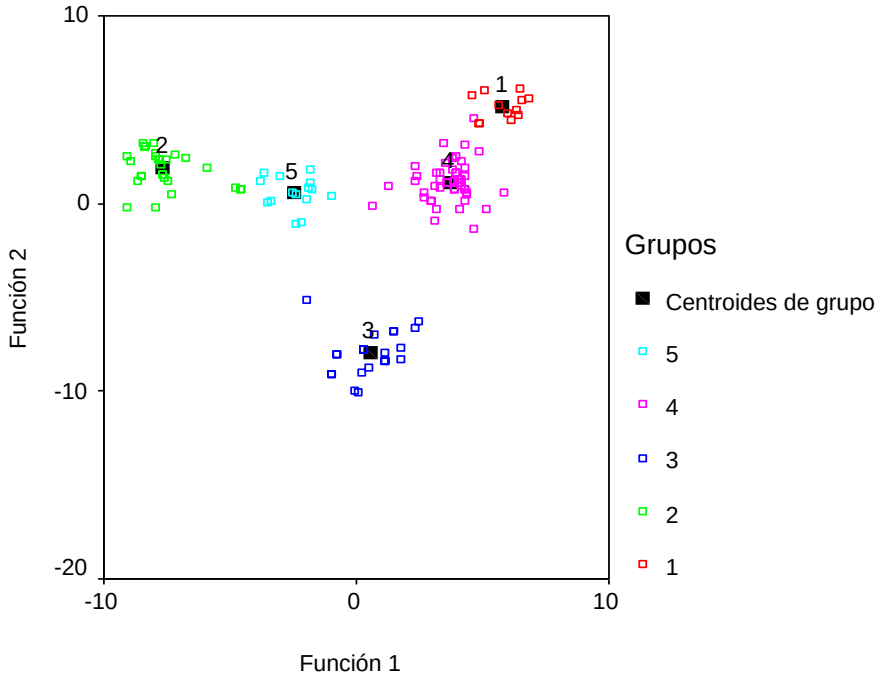


Fig. 5.17. Diagrama de dispersión de los 5 grupos de movimientos en masa en relación con las funciones discriminantes

Tabla 5.51. Matriz de estructura del análisis discriminante (correlaciones entre las variables discriminantes y las funciones discriminantes canónicas tipificadas)

	Función 1	Función 2
Sector de la ladera : alto	-.488	
Altitud entre 1600-1900 m	-.404	
Sector de la ladera: bajo	.276	
Cubierta vegetal: matorral	.126	
Exposición NE	-.115	
Pendiente ladera 0-20º		-.254
Exposición SE		.163
Altitud entre 700-1000 m		-.141
Arcillas-margas		-.132

Para no alargar la tabla sólo se han incluido algunas de las mayores correlaciones absolutas

Tabla 5.52. Resultados de clasificación

	Grupo de pertenencia pronosticado					
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	Total
1	12 100%	0	0	0	0	12 100%
2	0	30 96.8%	0	0	1 3.2%	31 100%
3	0	0	24 100%	0	24	24 100%
4	0	0	0	52 100%	0	52 100%
5	0	0	0	0	15 100%	100 100%

En definitiva, puede afirmarse que en el área de estudio se distinguen tres grandes tipos de desprendimientos:

El tipo A (grupos 1 y 4) incorpora procesos que se activan en los taludes que recorren pies de ladera, orientados al sureste, en una franja altitudinal media (entre 1000-1300 metros). Es decir, allí donde terminan, tras recorrer las laderas (rectas o convexas), las escorrentías, especialmente las subsuperficiales, que saturan los cortes-taludes (T1) de las pistas forestales. Estos taludes se encuentran parcialmente recubiertos de matorral. Dentro del tipo A las diferencias entre el grupo 1 y 4 vienen remarcadas por la litología, el tamaño del desprendimiento y la pendiente del talud (Tabla 5.53). El grupo 1 es propio de materiales pizarrosos mientras que el 4 aparece principalmente en areniscas. Los movimientos en masa del grupo 1 son de dimensiones más modestas (2.5 m^3 de media frente a los 7.9 m^3 del grupo 4) y se activan en taludes de pendiente más suaves (45.2º frente a 56.3º del grupo 4). La tabla 5.54 indica que el 100% de los casos del grupo 1 se han encontrado en la pista Valgañón-Ezcaray mientras que los casos del grupo 4 se distribuyen entre la pista de Hoyos de Iregua y Ocón-Arnedillo.

Tabla 5.53. Valores medios (variables cuantitativas) y frecuencias de distribución más elevadas (variables cualitativas) en los grupos de desprendimientos seleccionados por el análisis cluster jerárquico

	G1	G2	G3	G4	G5	valor p
Vol. Despren. (m^3)	2.5	6.7	3.7	7.9	29.6	.000*
Litología	Pizarras 83.3%	Pizarras 51.6%	Arcillas 66.7%	Areniscas 65.4%	Morrenas 60%	.000**
Altitud (m)	1112	1699	988	1135	1614	.000*
Exposición (º)	90-180 100%	0-90 51.6%	270-360 54.2%	90-180 69.2%	270-360 53.3%	.000**
Pendiente ladera (º)	36	30.8	16.1	26.9	30.6	.000*
Forma ladera	Recta 66.7%	Cóncava 54.8%	Convexa 79.2%	Convexa 63.5%	Cóncava 100%	.000**
Sector ladera	Bajo 100%	Alto 90.3%	Medio 75%	Bajo 86.5%	Medio 100%	.000**
Pendiente talud (º)	45.2	48.3	49.4	56.3	42.5	.000*
Altura talud (m)	2.5	3.7	2.5	3.2	7.5	.000*
Longitud talud (mt)	4.1	5.6	3.7	4.2	13.2	.000*
Cub. veg. talud (%)	43.5	45.4	30.1	39.6	38.7	.565*
Tipo cub. veg. talud	Matorral 50%	Herbáceas 64.5%	Matorral 75%	Matorral 78.8%	Herbáceas 53.3%	.000**

* significación obtenida a partir de ANOVA; ** significación obtenida a partir de Chi-cuadrado

El tipo B (grupos 2 y 5) incluye movimientos en masa que aparecen a altitudes elevadas (por encima de los 1600 metros), en sectores medios y altos de laderas con formas cóncavas, y orientaciones preferentemente septentrionales (noroccidental y nororiental). Los taludes están cubiertos de vegetación herbácea (Tabla 5.53). Todos los datos inducen a pensar que son sectores donde se saturan con facilidad los suelos, especialmente en momentos de fusión de nieve. La ruptura del perfil de la ladera por medio de los taludes de las pistas provoca movimientos en masa de dimensiones importantes. Dentro del tipo B, el grupo 2 presenta desprendimientos de menor tamaño que los medidos en el grupo 5 (6.7 m^3 para el primero y 29.6 m^3 para el segundo). Los movimientos en masa de este grupo 5 se activan en pistas forestales que cruzan materiales morrénicos, que han obligado a diseñar taludes de una

importante longitud y altura. Los desprendimientos del grupo 2 se reparten entre la pista de Valgañón-Ezcaray y Hoyos de Iregua mientras que los del grupo 5 son exclusivos de la pista de Hoyos de Iregua (tabla 5.54).

El tipo C (grupo 3) corresponde a desprendimientos de pequeño tamaño (3.7 m^3), desarrollados a escasa altitud (por debajo de los 1000 metros), en tramos de pista forestal que disecciona pendientes muy suaves (16.1º) y en taludes de fuerte pendiente (49.4º) y escasa cubierta vegetal (30%). La mayor parte de estos desprendimientos se encuentran en la pista de Ocón-Arnedillo. Corresponden a movimientos en masa desarrollados en taludes que seccionan laderas ocupadas por bancales agrícolas. Éstos a menudo quedan colgados sobre el corte-talud en posiciones muy inestables (Foto 5.22).



Foto 5.22. Movimiento en masa en el corte-talud (T1) de la pista forestal de Ocón-Arnedillo. Afecta a un muro de bancal agrícola situado sobre el talud.

Tabla 5.54. Distribución de los grupos de movimientos en masa por pistas forestales

	P. Valgañón	P. Hoyos	P. Ocón	Total
Grupo 1	12 100%			12 100%
Grupo 2	16 51.6%	15 48.4%		31 100%
Grupo 3	5 20.8%		19 79,2%	24 100%
Grupo 4	4 7.7%	32 61.5%	16 30.8%	52 100%
Grupo 5		15 100%		15 100%

5.2.4.6. Zonas críticas en los taludes

La distribución espacial de los movimientos en masa a lo largo de las pistas presenta una clara tendencia a la concentración en determinados tramos donde la dinámica hidrológica y geomorfológica es más activa. (Foto 5.20 y Figuras 5.18 a,b,c). Es en estos tramos además donde se observan los movimientos en masa más espectaculares repitiéndose tanto en el corte-talud (T1) como en el talud inferior (T2) (Figura 5.19).

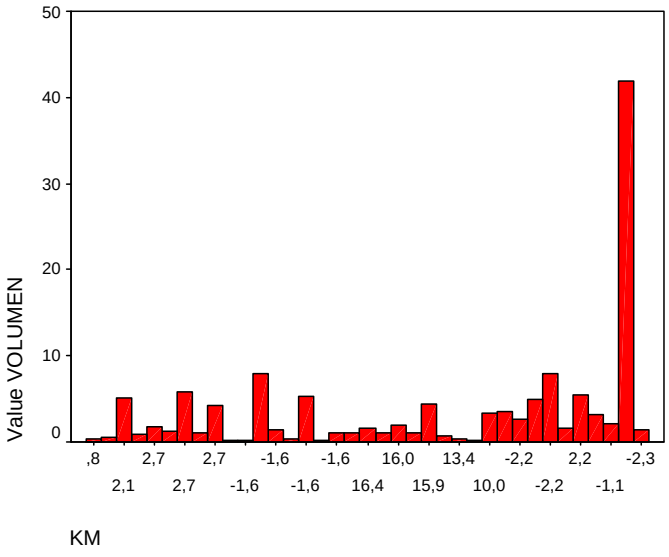


Fig. 5.18.a Distribución del volumen movilizado a lo largo del recorrido de la pista Valgañón-Ezcaray (P1)

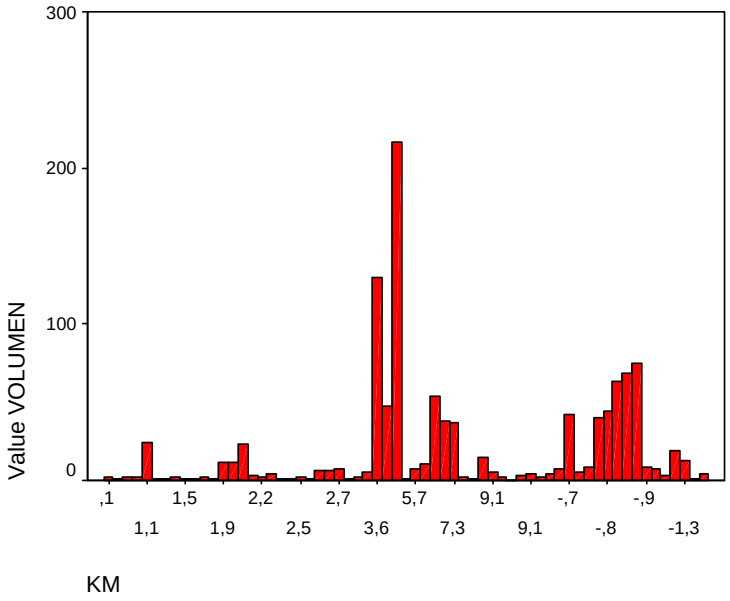


Fig. 5.18.b Distribución del volumen movilizado a lo largo del recorrido de la pista de Hoyos de Iregua (P2)

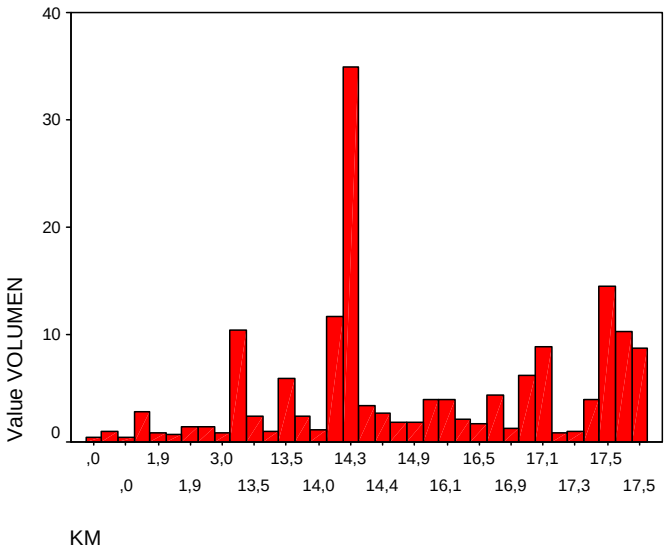


Fig. 5.18.c Distribución del volumen movilizado a lo largo del recorrido de la pista Ocón-Arnedillo (P7)

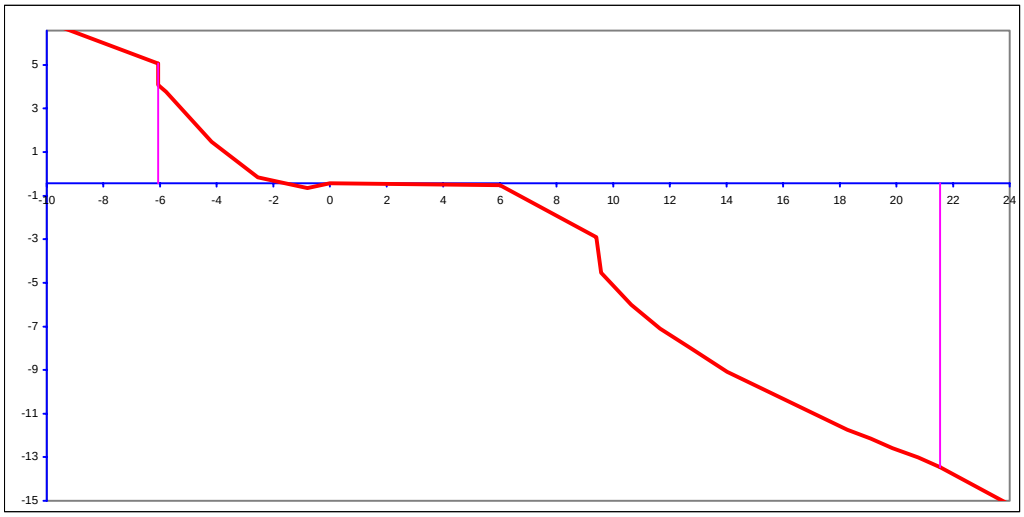


Fig. 5.19. Perfil de un corte-talud (T1) y un talud inferior afectados por movimientos en masa en la pista forestal de Hoyos de Iregua (P2)

Las secciones críticas ya han ido perfilándose en los apartados anteriores. No obstante, merece la pena definirlas con mayor precisión a partir de los movimientos en masa que, dadas sus dimensiones (por encima de la media), presentan un 20% de probabilidades de activarse. Según este criterio, en las tres pistas forestales se ha catalogado 29 movimientos en masa que vendrían a identificar las zonas críticas. En nuestro caso el 72.4% de estas zonas se encuentran en la pista de Hoyos de Iregua, el 24.1% en Ocón-Arnedillo y el 3.4% en Valgañón-Ezcaray. La tipología de los movimientos en masa producidos en estas zonas se recoge en la tabla 5.55, en la que se observa el predominio de los deslizamientos planares tanto en número como en volumen movilizado.

Tabla 5.55. Tipos de movimientos en masa en las zonas críticas de los taludes de pistas forestales

Tipos de procesos	Prof. m	Nº	%	Volumen Medio m^3	Des. st.
Planares muy superficiales	0.59	4	13.8	21.29	13.88
Planares superficiales	1.00	8	27.6	73.32	67.05
Rotacionales	0.98	4	13.8	22.83	11.02
Coladas mixtas	0.77	4	13.8	55.18	27.59
Desprendimientos en bancales	1.55	7	24.1	14.23	9.35
Desprendimientos rocosos	1.37	2	6.9	23.92	18.72

Sin duda, los tramos de pista más críticos se encuentran en Hoyos de Iregua, en un sector en el que la pista secciona acumulaciones de materiales morrénicos. A lo largo de 300 metros tanto el corte-talud (T1) como el talud inferior (T2) presentan un serie continuada de deslizamientos superficiales. La inestabilidad del sector se ha intentado controlar por medio de gaviones que con grandes dificultades intentan retener el material movilizado. Lo habitual es que, una vez colmatados, se vean sobrepasados por los bloques de piedras o paquetes de suelo. En la ladera expuesta al oeste y con fuertes pendientes se producen los procesos más graves que destruyen los gaviones (Foto 5.21). Tan sólo cuando encima del corte-talud se desarrolla una ladera de escasa pendiente o rellano plano los gaviones o la cubierta vegetal logran contener el movimiento de sedimentos.







5.23. Deslizamiento de piedras y rocas en un corte-talud saturado. TS25-P2.

5.24 . Colada de barro y piedras que revienta el talud inferior justo debajo del proceso anterior. Vista desde la pista. TI4-P2.

5.25. Vista de la cicatriz de 15 metros de longitud desde la que el material se deslizó hasta el río 40 metros más abajo.

Otros sectores críticos para la activación de movimientos en masa son las áreas donde se concentran las escorrentías, especialmente la subsuperficial, y las áreas que transitan por laderas que previamente a la instalación de la pista eran muy inestables, al disponer de deslizamientos o grandes desprendimientos. Las primeras coinciden con pies de laderas o laderas próximas a los ejes de los barrancos. Si además de reunir esta característica, la ladera presenta una configuración cóncava, las posibilidades de concentrar agua y, por lo tanto, de saturarse los suelos son muy elevadas. En la pista de Hoyos de Iregua, por ejemplo, la concentraciones de flujos superficiales ocasionan deslizamientos en el corte-talud (T1) que tienen su continuidad en el talud inferior (T2) por medio lenguas muy fluidas (fotos 5.23-5.25).

Si la pista forestal discurre por laderas muy inestables, es muy probable que en sus taludes se desencadenen un buen número de movimientos en masa. En la pista Valgañón-Ezcaray, las laderas del tramo que discurre por la cabecera activa del Menárez, difícilmente pueden ser contenidas por el hayedo, y se desencadenan procesos visibles todos los años tras la estación invernal o después de intensas y continuas lluvias.

5.3. Aproximación a la evaluación del riesgo por movimientos en masa en pistas forestales

En este apartado no se pretende aplicar el concepto de riesgo total (Varnes, 1984) en el estudio de los movimientos en masa en pistas forestales. De hecho, hay aspectos, como la vulnerabilidad o los elementos en riesgo, que exigirían el concurso de otros especialistas y una información más compleja (Carrara et al. 1991; Flageollet, 1999; Montgomery et al., 1999; Hoeck et al. 2000; Chacón, 2003; Baeza y Corominas, 2001). Nuestro objetivo es más modesto. A partir de la cartografía de distribución y tamaño de los movimientos en masa activados en pistas forestales, y con el conocimiento previo del papel de determinadas variables en esta distribución, se pretende predecir, apoyados en un Sistema de Información Geográfica y en el análisis estadístico, las zonas inestables donde es más probable que se produzcan movimientos en masa, sin una indicación del cuándo, aspecto que obligaría a manejar otras técnicas y a aplicar un análisis más profundo de las variables tanto condicionantes como desencadenantes. La cartografía resultante que se presenta, pues, será lo que Brabb (1984) o Carrara *et al.* (1995) denominaron un mapa de susceptibilidad de deslizamientos. El principio que anima a la obtención de estos mapas es que "el presente y el pasado son las llaves del futuro", lo que significa que los movimientos en masa en pistas forestales son más probables en aquellas zonas que presentaron en el pasado o presentan en la actualidad condiciones de inestabilidad. Del mismo modo, otras pistas forestales que circulan por laderas que reúnan las mismas características tienen muchas probabilidades de verse afectadas por movimientos en masa.

El proceso de elaboración de la cartografía de riesgos así como la metodología utilizada para valorar el peso de las variables en el desencadenamiento de los procesos y predecir las posibilidades de activación de movimientos en masa fue expuesto en el apartado de métodos. La primera fase de trabajo exigió la elaboración una cartografía detallada de las variables a considerar y un inventario de deslizamientos.

5.3.1. Cartografía de variables

La zona de estudio (Figura 5.20 y Foto 5.26), en la Sierra de Cebollera, ocupa una

superficie total de 7600 Ha e incorpora las cabeceras del río Iregua y del arroyo de Puente Ra (Hoyos de Iregua). El sector es recorrido por varias pistas no asfaltadas entre las que destaca la que asciende a los Hoyos del Iregua y finaliza en la ermita de Lomos de Orio (Mapa 5.1).

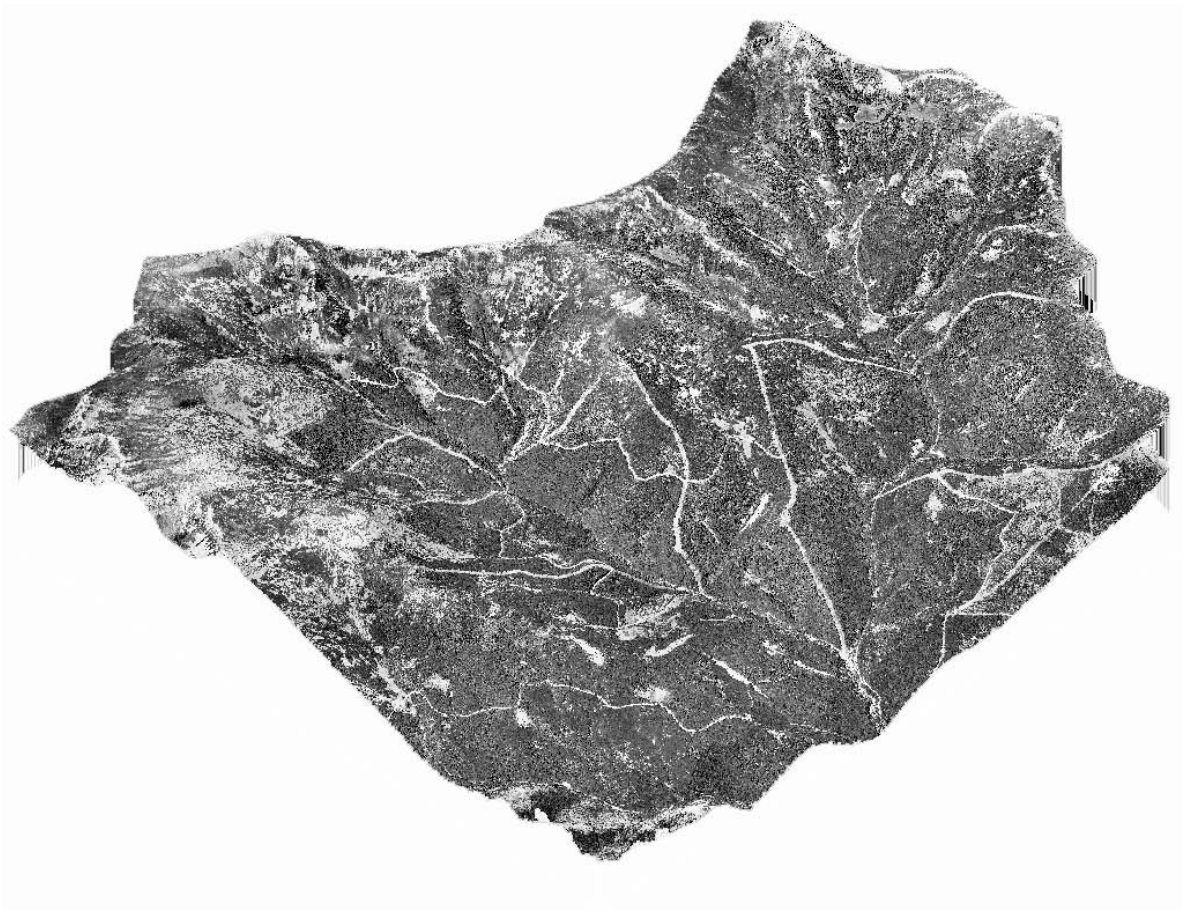
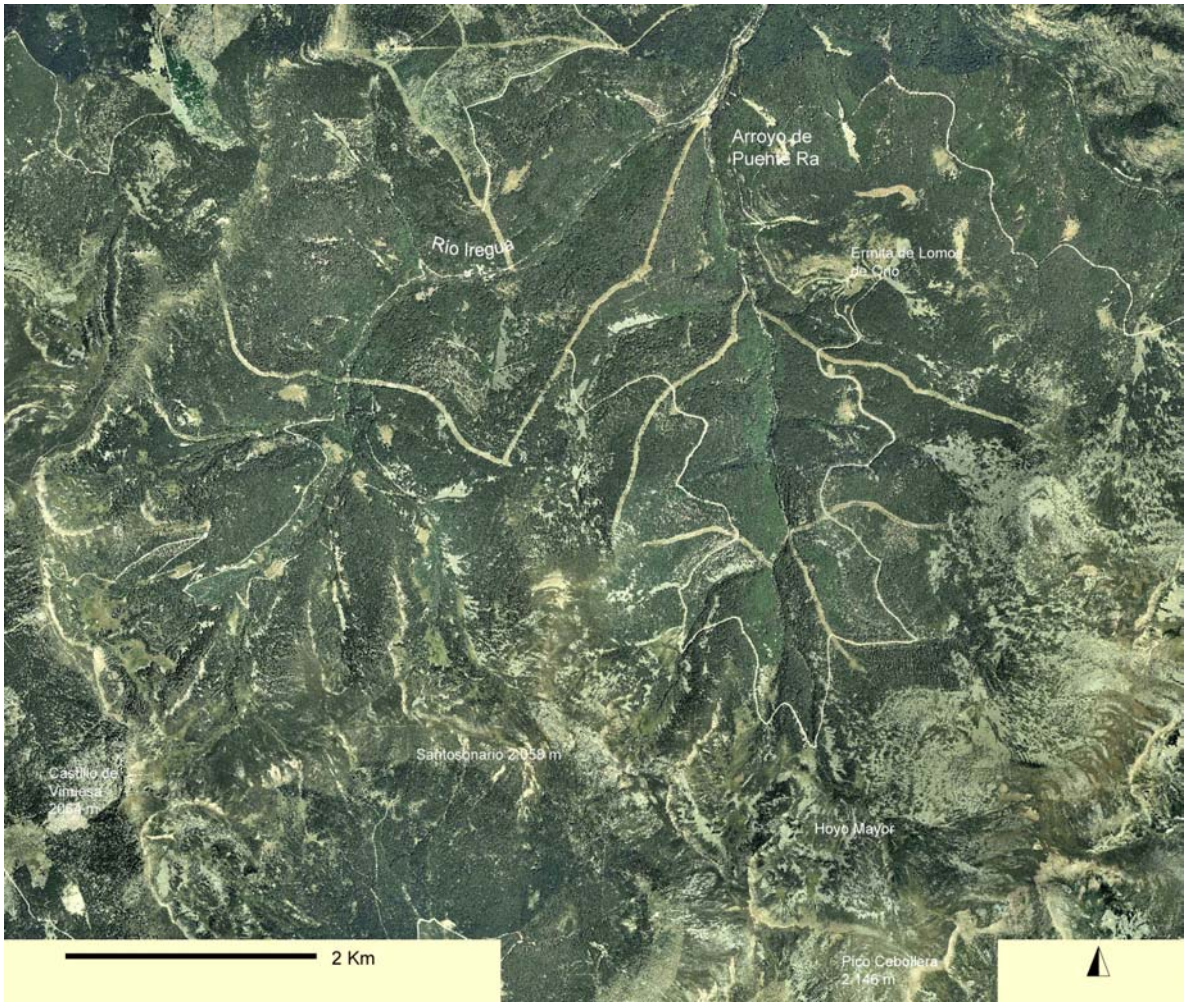


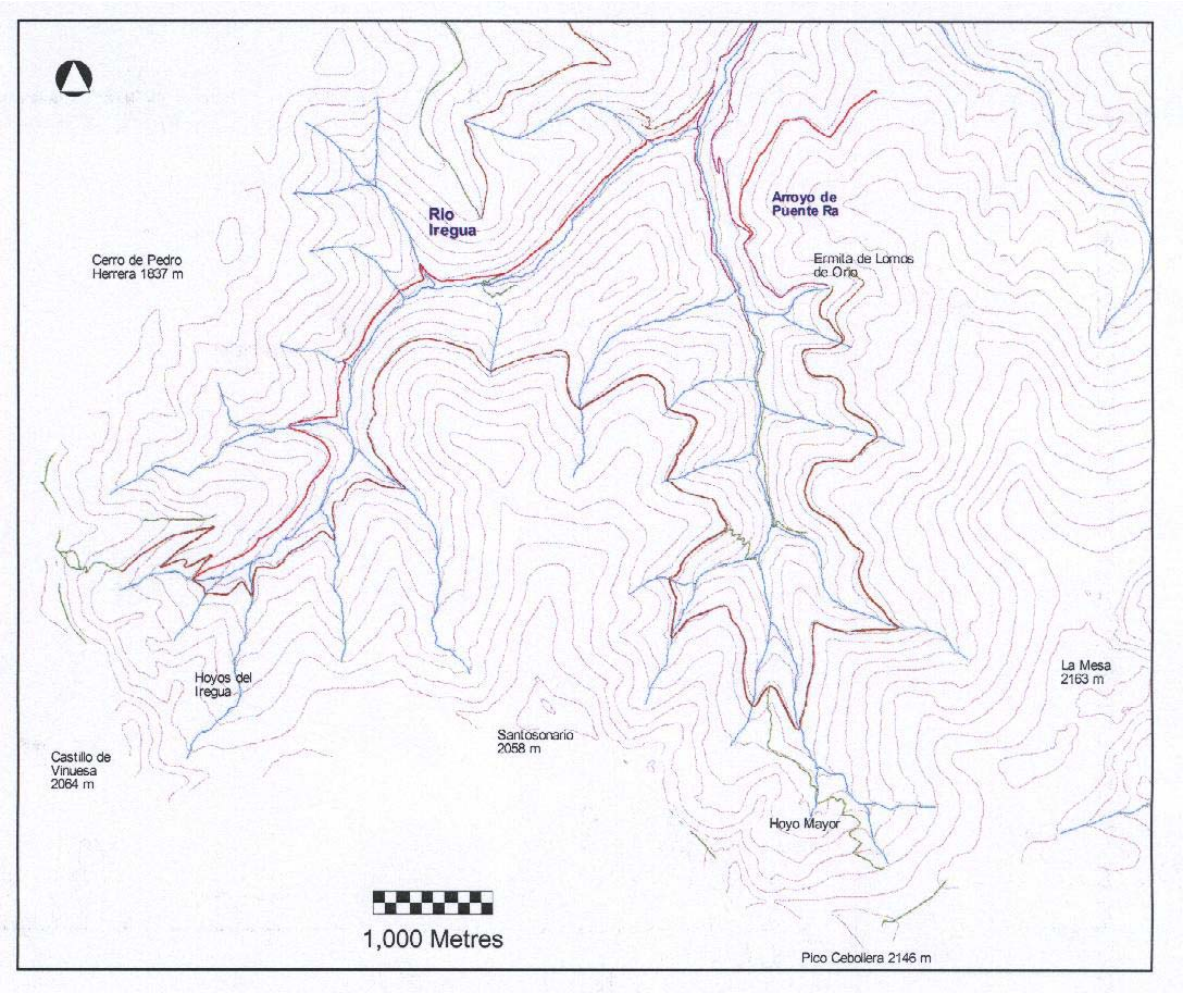
Fig. 5.20. Bloque diagrama de la cabecera del río Iregua con el recorrido de la pista Hoyos de Iregua. Puede observarse el Castillo de Vinuesa, al fondo, y la Mesa de Cebollera, a la izquierda.

Los 12.8 kilómetros de pista analizada han sido divididos en 31 unidades de ladera (en adelante, UL), método de recogida de datos ampliamente utilizado, y que en nuestro caso ha sido realizado a partir de la topografía y del conocimiento adquirido en el trabajo de campo (Mapa 5.2). Una banda de 50 metros aguas arriba y aguas debajo de la pista (100

Foto 5.26. Ortoimagen del área de estudio. Sierra de Cebollera, Sistema Ibérico noroccidental. La Rioja. Sección de Sistemas de Información Geográfica y Cartografía. Dirección General de Política Territorial. Gobierno de La Rioja.



Mapa 5.1. Mapa de pistas forestales del área de estudio. Parque Natural de la Sierra de Cebollera. Sistema Ibérico noroccidental. La Rioja.



Pista primaria

Pista secundaria

Camino o trocha

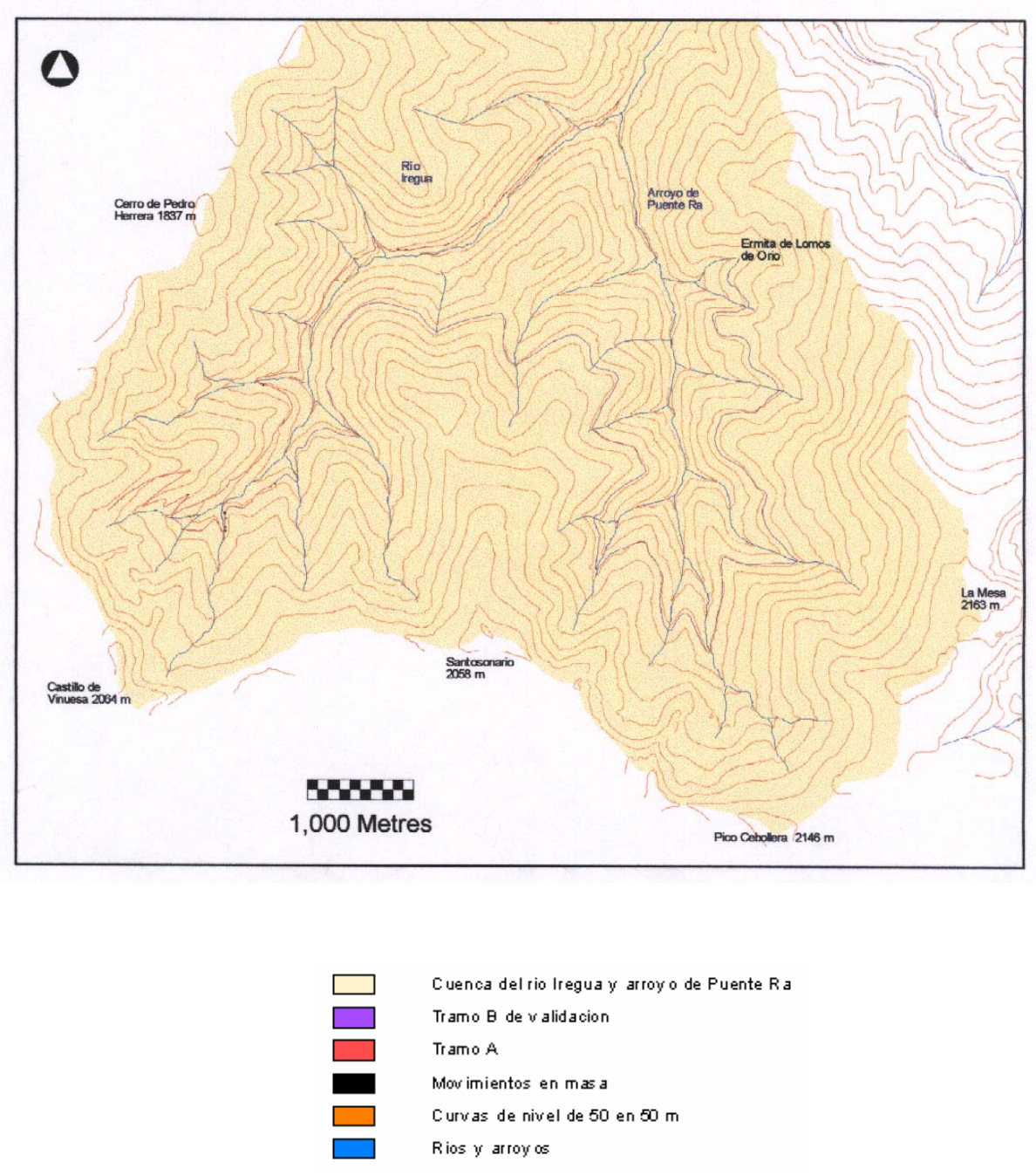
Carretera local

Curvas de nivel (equidistancia 50 m)

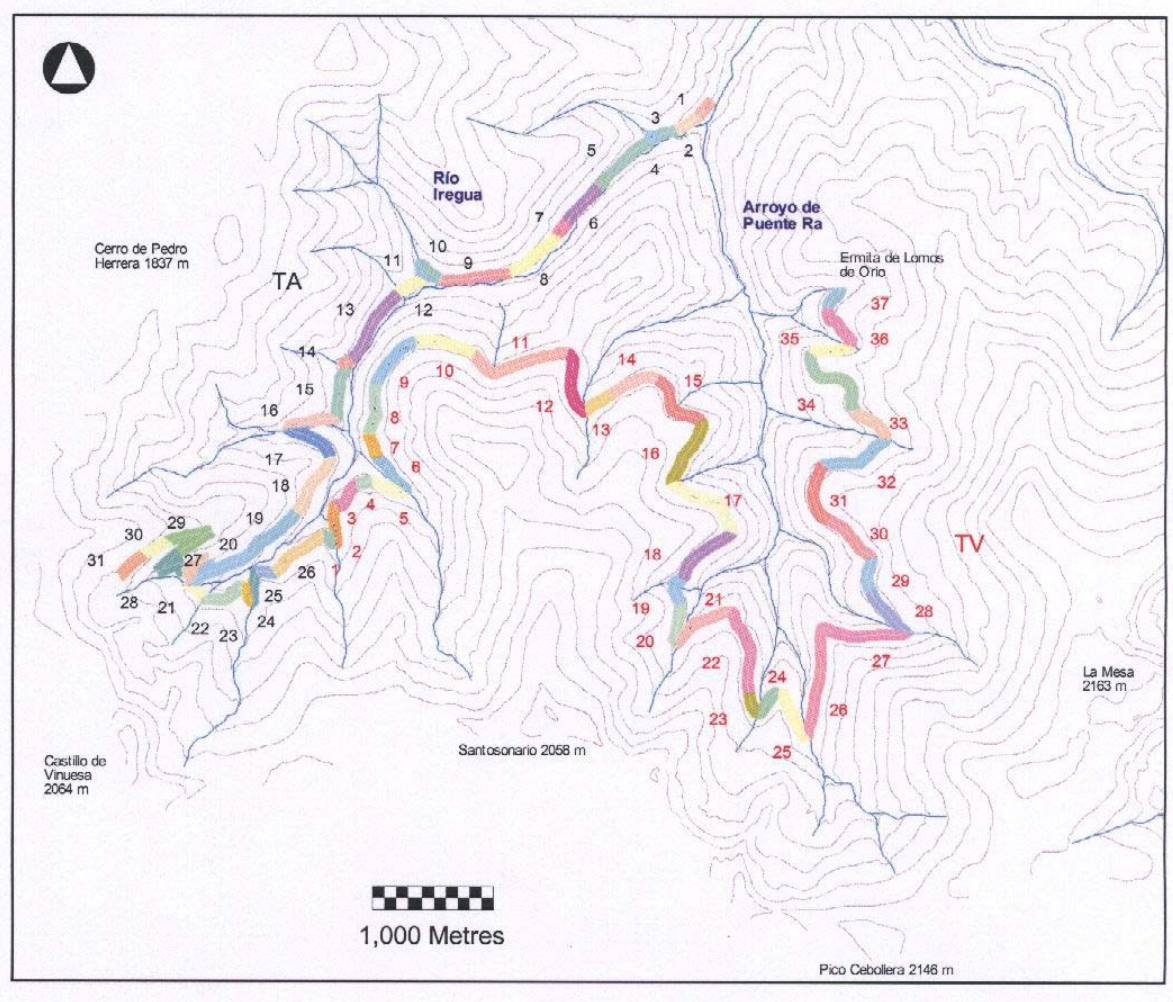
Ríos y arroyos

Mapa 5.2. Mapa de la cuenca del área de estudio con los dos tramos, de análisis (A) y validación (B) y los procesos estudiados en la pista Hoyos de Iregua-Puente Ra.

Sierra de Cebollera



Mapa 5.3. Pista forestal de Hoyos de Iregua con la banda de 50 m y la diferenciación de las unidades de ladera (UL) del tramo de análisis (TA) y de validación (TV)
Parque Natural de la Sierra de Cebollera.



metros en total) ha sido la considerada para el análisis de la cartografía de inestabilidad a partir de las unidades de ladera (UL) (Mapa 5.3). La elección de esta banda de 50 metros se basa en el hecho de que, en nuestra área de estudio, no se observan procesos activos en las laderas más allá de los 85 metros de distancia a la calzada de la pista. No obstante, esto sí puede ocurrir en otras montañas alpinas o de áreas más húmedas (Larsen & Parks, 1997).

También se dispuso de un tramo de validación (TV) de 18.9 kilómetros, contiguo al anterior y dividido en 37 UL. Este tramo fue utilizado para comprobar la bondad del método calculado y validar los resultados obtenidos (Mapa 5.3).

Es bien conocido que los factores que intervienen en la generación de los movimientos en masa en pistas forestales son numerosos. Algunos de ellos ya han sido tratados en capítulos anteriores. Desgraciadamente la obtención de datos se hace muy complicada y costosa. Por ello, se ha optado por conseguir aquellos que, habiendo observado que son importantes, pueden obtenerse a partir de cartografía automática y pueden ser manipulados con Sistemas de Información Geográfica.

5.3.1.1. Variables derivadas de la altimetría digital (MDT)

Una vez confeccionado el MDT a partir de la cartografía 1:5.000 del Gobierno de La Rioja, mediante distintas operaciones incorporadas en el SIG se logró información importante para el análisis de los procesos de erosión en masa. En concreto, el MDT permitió elaborar los siguientes mapas con una resolución de 5x5 metros/pixel:

Tabla 5.56. Distribución de las UL (unidades de ladera) y “pixels” en la pista forestal estudiada según la altitud para el tramo analizado y el de validación

TA (Tramo analizado)

Altitud (m)	1150-1350	1350-1550	1550-1750	>1750 m	TOTAL
Número de UL	9	8	11	3	31
Número de pixels	10950	10646	13393	4561	39550
Superficie (Ha)	27.38	26.61	33.48	11.40	98.87

TV (Tramo de validación)

Altitud (m)	1150-1350	1350-1550	1550-1750	>1750 m	TOTAL
Número de UL	0	15	22	0	37
Número de pixels	0	24513	38274	0	62787
Superficie (Ha.)	0	61.28	95.69	0	156.97

Mapa de altitudes. Se confeccionó un mapa de altitudes para el área de estudio general y se calcularon las diferentes altitudes tanto de la pista forestal como de las UL (Mapa 5.4) En la tabla 5.56 se recoge información de la distribución de las UL por intervalos de altitud.

Mapa de exposiciones. Se realizó un mapa de exposiciones y se obtuvo información sobre las orientaciones de las UL. Los valores considerados fueron norte, sur, este y oeste (Mapa 5.5). Los datos obtenidos quedan resumidos en la tabla 5.57.

Tabla 5.57. Distribución de las UL (unidades de ladera) y "pixels" en la pista forestal estudiada según la orientación para el tramo analizado y el de validación

TA (Tramo analizado)

Orientación	Norte	Sur	Este	Oeste	TOTAL
Número de UL	4	12	14	1	31
Número de pixels	5759	14312	18860	572	39503*
Superficie (Ha.)	14.39	35.78	47.15	1.43	98.75

* 47 pixels fueron clasificados sin orientación

TV (Tramo de validación)

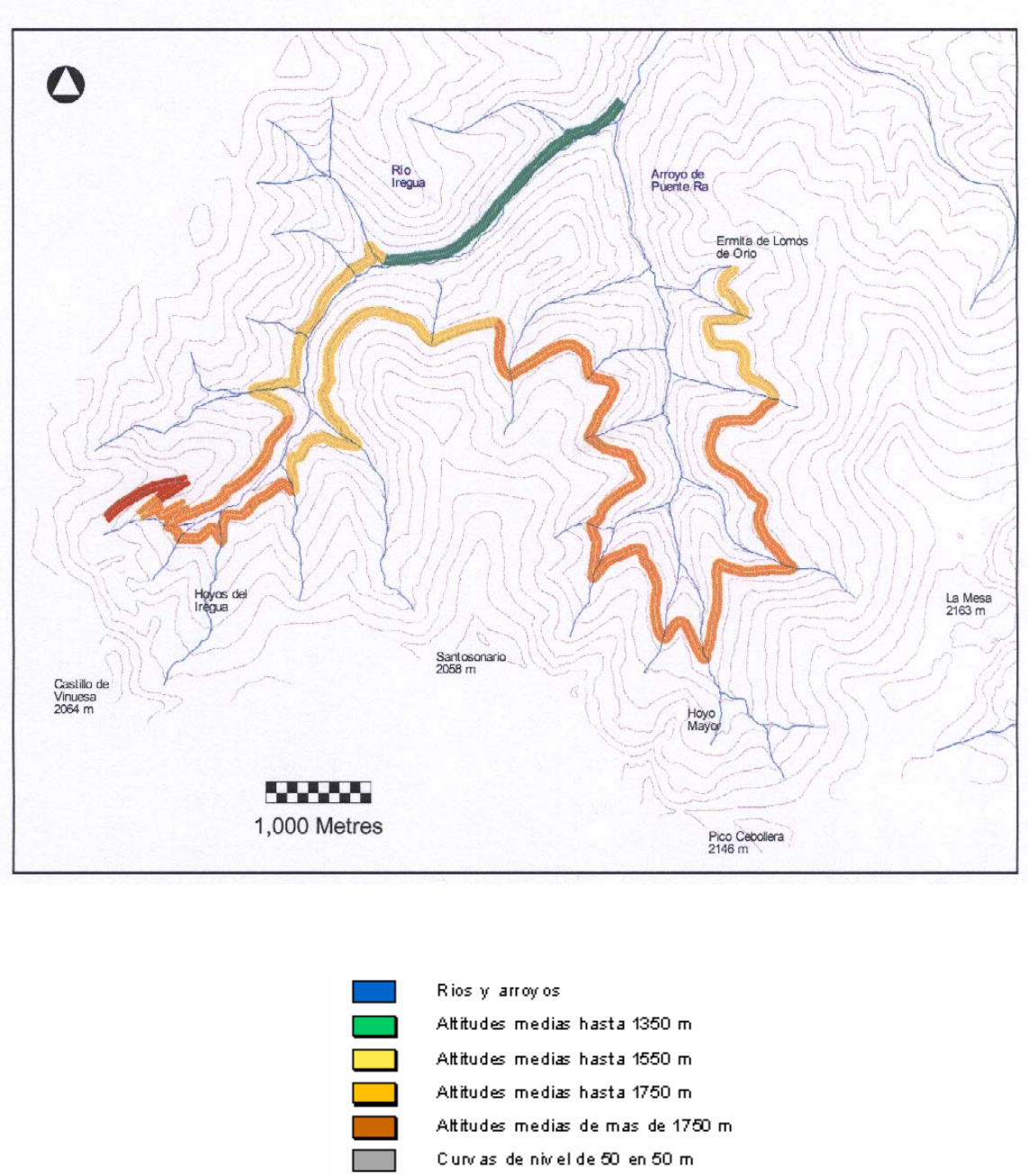
Orientación	Norte	Sur	Este	Oeste	TOTAL
Número de UL	13	0**	9	15	37
Número de pixels	22822	4331	14181	21424	62758*
Superficie (Ha.)	57.06	10.83	35.45	53.56	156.97

* 29 pixel fueron clasificados sin orientación

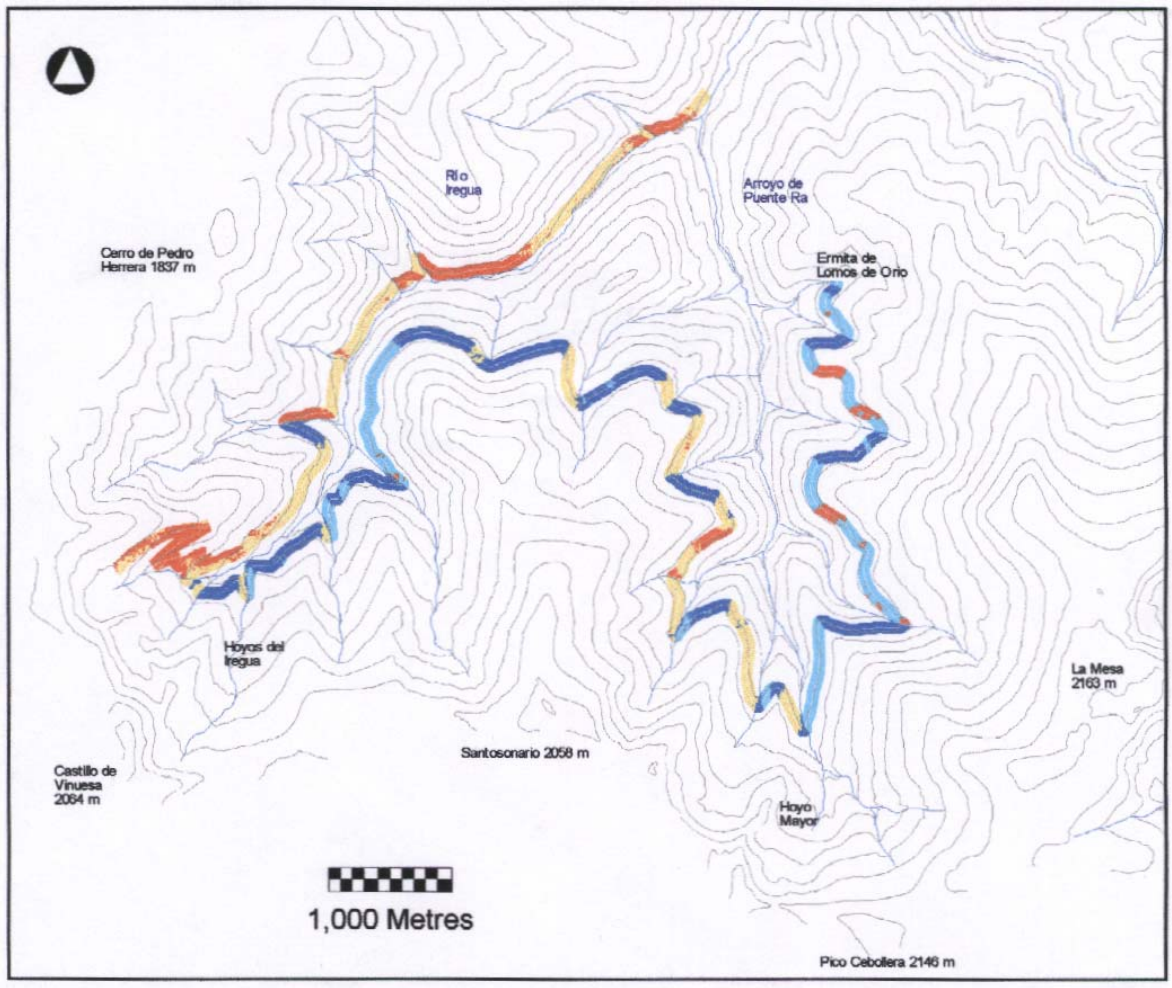
** El concepto de orientación hace referencia a la exposición dominante en las UL. Esto explica que en el cómputo de píxeles aparezcan 4331 casos y en el número de UL el valor 0 (al no ser los primeros dominantes en ninguna UL).

Mapa de pendientes. Se diseñó un mapa de pendientes para el área de estudio general y para las UL (Mapa 5.6). Esta cartografía fue decisiva para conocer el direccionamiento de las escorrentías. Los datos obtenidos quedan resumidos en la tabla 5.58.

Mapa 5.4. Mapa de altitudes medias de las unidades de ladera por intervalos.
Pista de Hoyos de Iregua-Puente Ra. Parque Natural de la Sierra de Cebollera.
Sistema Ibérico noroccidental. La Rioja.



Mapa 5.5. Mapa de exposiciones correspondiente a la zona por la que discurre la pista Hoyos de Iregua-Puente Ra. Parque Natural de la Sierra de Cebollera. Sistema Ibérico noroccidental. La Rioja.



Exposicion sur
Exposicion este
Exposicion oeste
Exposicion norte
Rios y arroyos
Curvas de nivel de 50 en 50 m

Tabla 5.58. Distribución de las UL (unidades de ladera) y "pixels" en la pista forestal estudiada según su pendiente para el tramo analizado y el de validación

TA (Tramo analizado)

Pend. %	0-20	21-30	31-40	41-50	51-60	>61	TOTAL
Número de UL	1	2	3	15	7	3	31
Número de pixels	1598	3942	8517	8599	7676	9218	39550
Superf. (Ha.)	3.99	9.85	21.30	21.50	19.19	23.04	98.87

TV (Tramo validación)

Pend. %	0-20	21-30	31-40	41-50	51-60	>61	TOTAL
Número de UL	0	0	8	19	8	2	37
Número de pixels	1730	6439	15991	15882	12590	10155	62787
Superf. (Ha.)	4.32	16.09	39.98	39.70	31.47	25.39	156.97

5.3.1.2. Variables climáticas e hidrológicas

En el área de estudio la mayor cantidad de precipitaciones se recogen en primavera, con máximas secundarias en invierno y otoño. El verano es una estación seca, aunque no es inhabitual el desarrollo de tormentas bastante intensas. De hecho, precipitaciones superiores a 30 mm en 24 horas suelen registrarse en esta estación y en la primavera (Tabla 5.59). Las máximas absolutas pueden alcanzar los 100 mm en 24 horas (Ortega Villazán, 1993). El número de días de precipitación a lo largo del año es elevado, 140 en Vinuesa, a 1326 m, y 144 en Ortigosa, a 1069 m.

Tabla 5.59. Número medio de días con precipitaciones superiores a 30 mm. Periodos 1970-75 y 1984-88

	E	F	M	A	My	J	Jl	Ag	S	O	N	D	
Aldeanueva	3	2	3	6	5	7	3	4	3	4	4	2	46
Barriomartín	6	3	2	8	3	7	2	2	5	3	9	2	52

Ortega Villazán (1993)

Las temperaturas mínimas se registran en el invierno (temperatura media mensual de enero -3.4º en el Puerto de Piqueras, a 1709 m). Durante esta estación y una buena parte de la primavera no es extraño observar suelos helados y una buena capa de nieve (Tabla 5.60). En marzo o abril la fusión favorece el desencadenamiento de deslizamientos.

Tabla 5.60. Número medio días de helada en el área de estudio

	E	F	M	A	My	J	Jl	Ag	S	O	N	D	
Vinuesa	25.7	21.4	21.7	12.6	5.9	0.8	0.5	0.1	1	6.1	17.6	24	137.4
Lumbreras	24.8	18	20.3	14	3	0.5	0	0.1	0.9	3.3	17.8	25.6	128.3

Ortega Villazán (1993)

Tabla 5.61. Precipitación total anual en las UL (unidades de ladera) y “pixels” en la pista forestal estudiada para el tramo analizado y el de validación

TA (Tramo analizado)

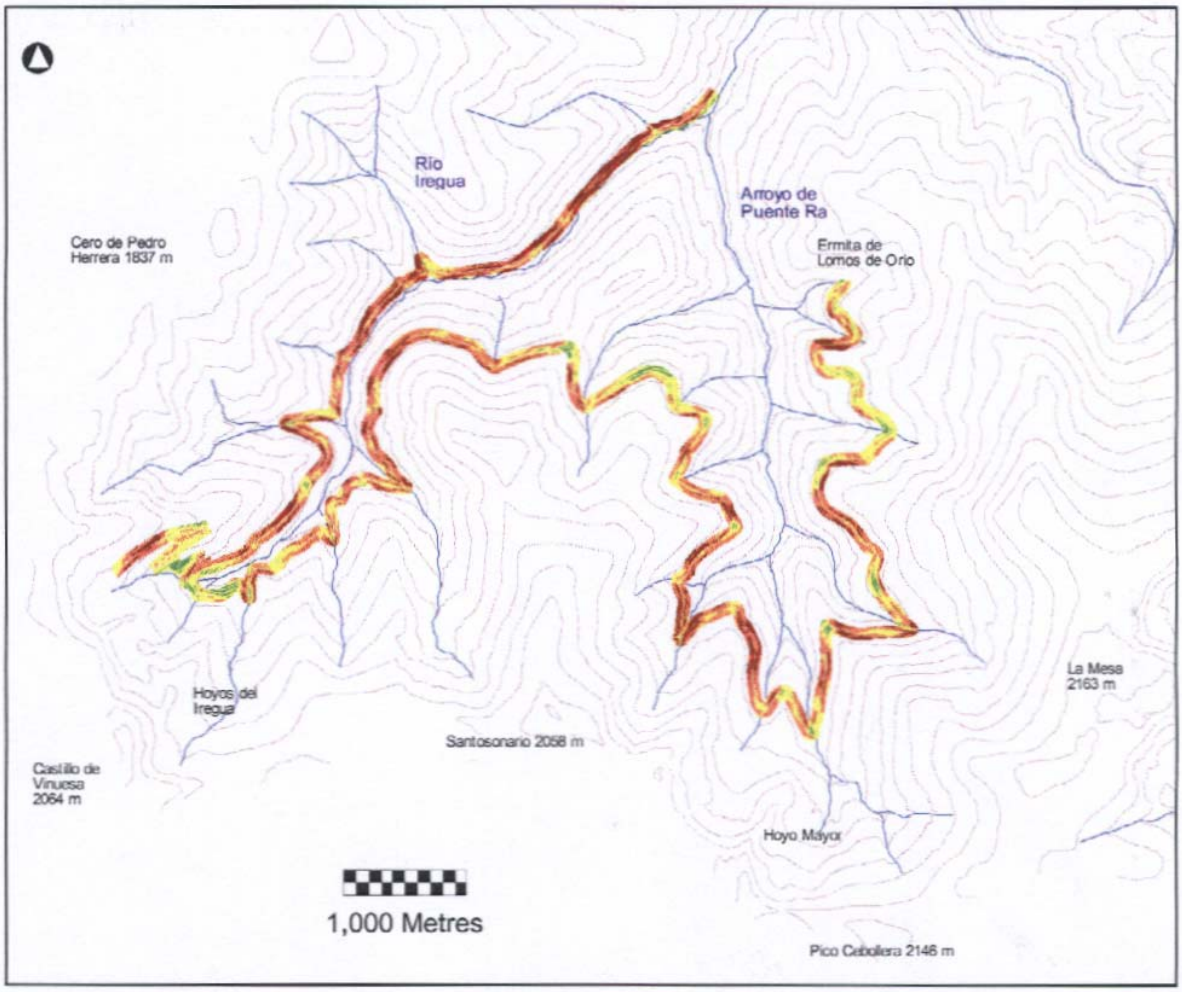
Pmm	<900	900-1000	1000-1100	1100-1200	1200-1300	>1300	TOTAL
Número de UL	9	7	4	11	0	0	31
Número de pixels	10845	8254	13282	7169	0	0	39550
Superf. (Ha.)	27.11	20.63	33.21	17.92	0	0	98.87

TV (Tramo validación)

Pmm	<900	900-1000	1000-1100	1100-1200	1200-1300	>1300	TOTAL
Número de UL	0	8	29	0	0	0	37
Número de pixels	0	12068	50719	0	0	0	62787
Superf. (Ha.)	0	30.17	126.80	0	0	0	156.97

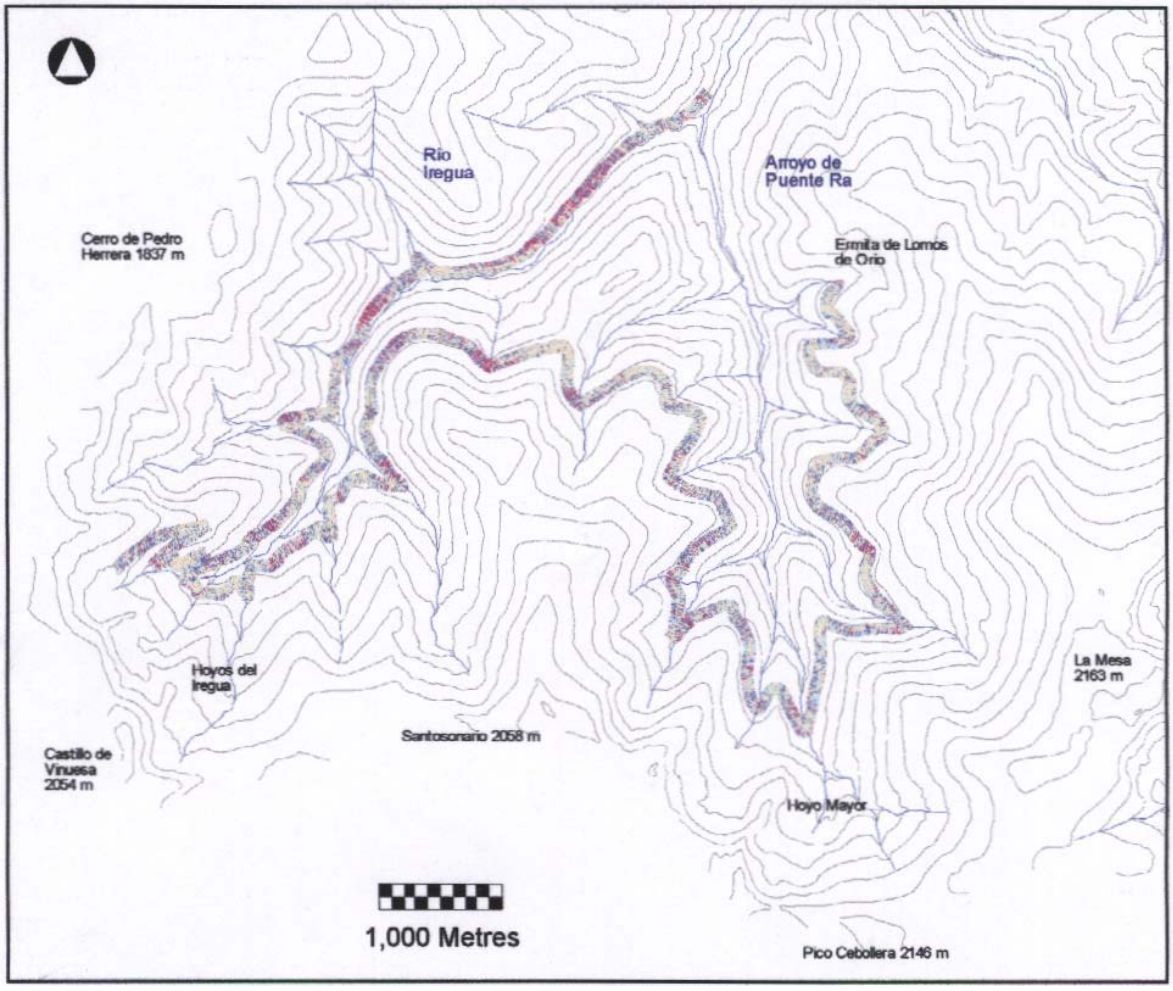
La información climática precisa en áreas de montaña no es fácil de obtener. Faltan estaciones meteorológicas completas y cuando existen disponen de registros escasos. El sector del Sistema Ibérico riojano no es una excepción, por lo tanto es prácticamente imposible disponer de datos directos y próximos a la pista forestal de Hoyos de Iregua.

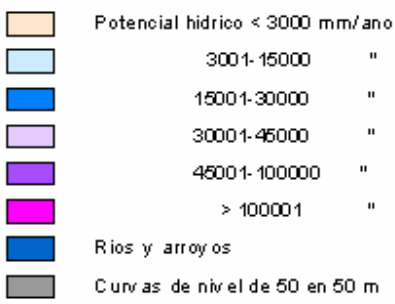
Mapa 5.6. Mapa de pendientes correspondiente a la zona por la que discurre la pista Hoyos de Iregua-Puente Ra. Parque Natural de la Sierra de Cebollera. Sistema Ibérico noroccidental. La Rioja.



< 20 %
21-40 %
41-60 %
61-80 %
> 80 %
Ríos y arroyos
Curvas de nivel de 50 en 50 m

Mapa 5.7. Mapa del potencial hídrico superficial correspondiente a la zona por la que discurre la pista Hoyos de Iregua-Puente Ra. Parque Natural de la Sierra de Cebollera. Sistema Ibérico noroccidental





Para solventar este problema se ha acudido a sistemas indirectos y a técnicas de interpolación espacial apoyadas en el SIG. Es evidente que no es el modo de aproximación al conocimiento de las variables climáticas más preciso, sin embargo es un sistema poco costoso, eficaz, de gran interés para el planificador -que exige mucha información en breve espacio de tiempo- y, desde luego, es el sistema más accesible para la metodología ensayada.

La información utilizada en nuestro trabajo ha sido la aportada por Ortega Villazán (1993) en su estudio del clima del sector noroccidental del Sistema Ibérico. También se ha contado con datos más recientes de las estaciones de Vinuesa y Ortigosa de Cameros, situadas al sur y al norte respectivamente del Sistema Ibérico riojano, obtenidos a través del Instituto Nacional de Meteorología. A partir de un análisis de regresión la autora mencionada relaciona altura y precipitación a partir de diferentes estaciones y obtiene un gradiente pluviométrico de 96 mm de precipitación por cada 100 metros de ascenso en las vertientes meridionales de Urbión y Cebollera, y 58 mm en las septentrionales. Estas regresiones (Pmm = 0.583x+119.56, para nuestra área de estudio) han sido aplicadas a la zona de la pista de Hoyos de Iregua en cada píxel y en las UL (Tabla 5.61). El resultado ha sido un mapa de precipitación total anual.

Tabla 5.62. Distribución de las UL (unidades de ladera) y "pixels" en la pista forestal estudiada según el potencial hídrico superficial para el tramo analizado y el de validación

TA (Tramo analizado)

mm/m^2/año	<500	500-1000	1000-1500	>1500	TOTAL
Número de UL	18	10	2	1	31
Número de pixels	19354	15500	3200	1496	39550
Superf. (Ha.)	48.38	38.75	8	3.74	98.87

TV (Tramo validación)

mm/m^2/año	<500	500-1000	1000-1500	>1500	TOTAL
Número de UL	24	12	1	0	37
Número de pixels	37463	21923	3401	0	62787
Superf. (Ha.)	93.66	54.81	8.50	0	156.97

A partir del MDT y de los datos de precipitación los sistemas de información geográfica permiten trazar y evaluar las líneas de concentración de escorrentía (redes de drenaje),

así como calcular las cantidades de agua drenadas en cada uno de los "pixels". Esta labor se realizó en nuestro estudio (Tabla 5.62), de modo que se dispuso de información sobre el potencial hídrico superficial (Mapa 5.7).

Finalmente, se obtuvo información sobre la distancia de las UL a los ríos para de este modo disponer de indicadores indirectos de las posibilidades de saturación de los suelos como consecuencia de las escorrentías subsuperficiales y flujos de retorno (Mapa 5.8)

5.3.1.3. Cubierta vegetal

A partir de la cartografía digital del Gobierno de La Rioja (ortoimagen de alta resolución) se ha procedido a la confección de la cartografía de vegetación y usos del suelo para la cabecera del alto valle del Iregua, así como la correspondiente a las UL de la pista forestal (Mapa 5.9). Se tuvieron en consideración las siguientes categorías: bosque denso de coníferas *(Pinus silvestris y Pinus uncinata)* (cubierta superior al 75%); bosque denso de caducifolios *(Fagus silvatica y Quercus pyrenaica)* (cubierta superior al 75%); bosque indiferenciado con cubierta entre el 50 y 75%; bosque indiferenciado con cubierta entre el 25 y 50%; bosque indiferenciado con cubierta inferior al 25%; matorral (escoba, brezos y acebales; en zonas de alta montaña, brecina, enebro enano y piorno); prados de montaña o pastizales; cubierta de pinos jóvenes que colonizan los espacios abiertos y soleados de los cortafuegos; y áreas sin vegetación. La información cuantitativa de la distribución de estos grupos se incluye en la tabla 5.63.

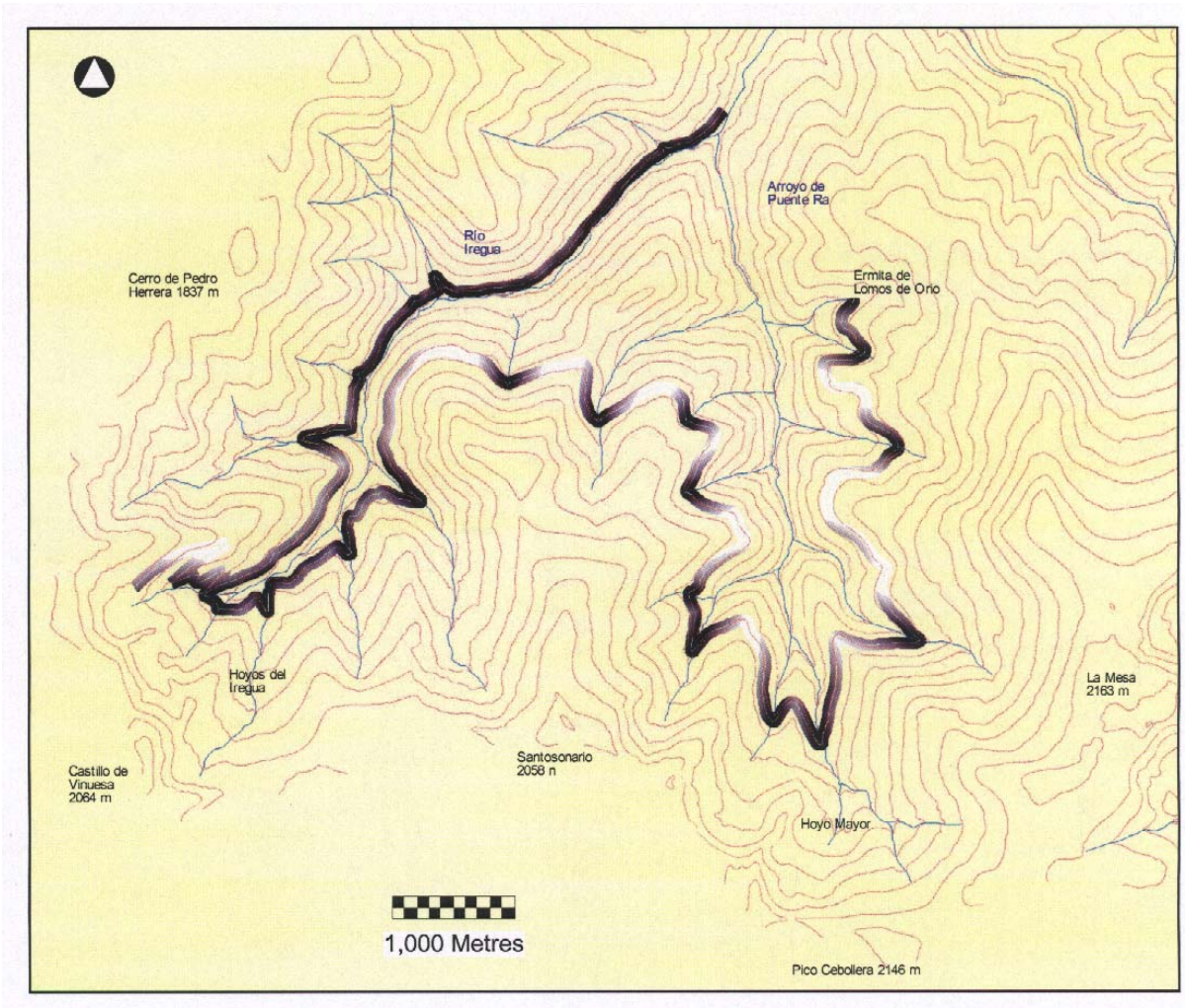
Tabla 5.63. Cubierta vegetal en las UL (unidades de ladera) y "pixels" de la pista forestal estudiada para el tramo analizado y el de validación

TA (Tramo analizado)

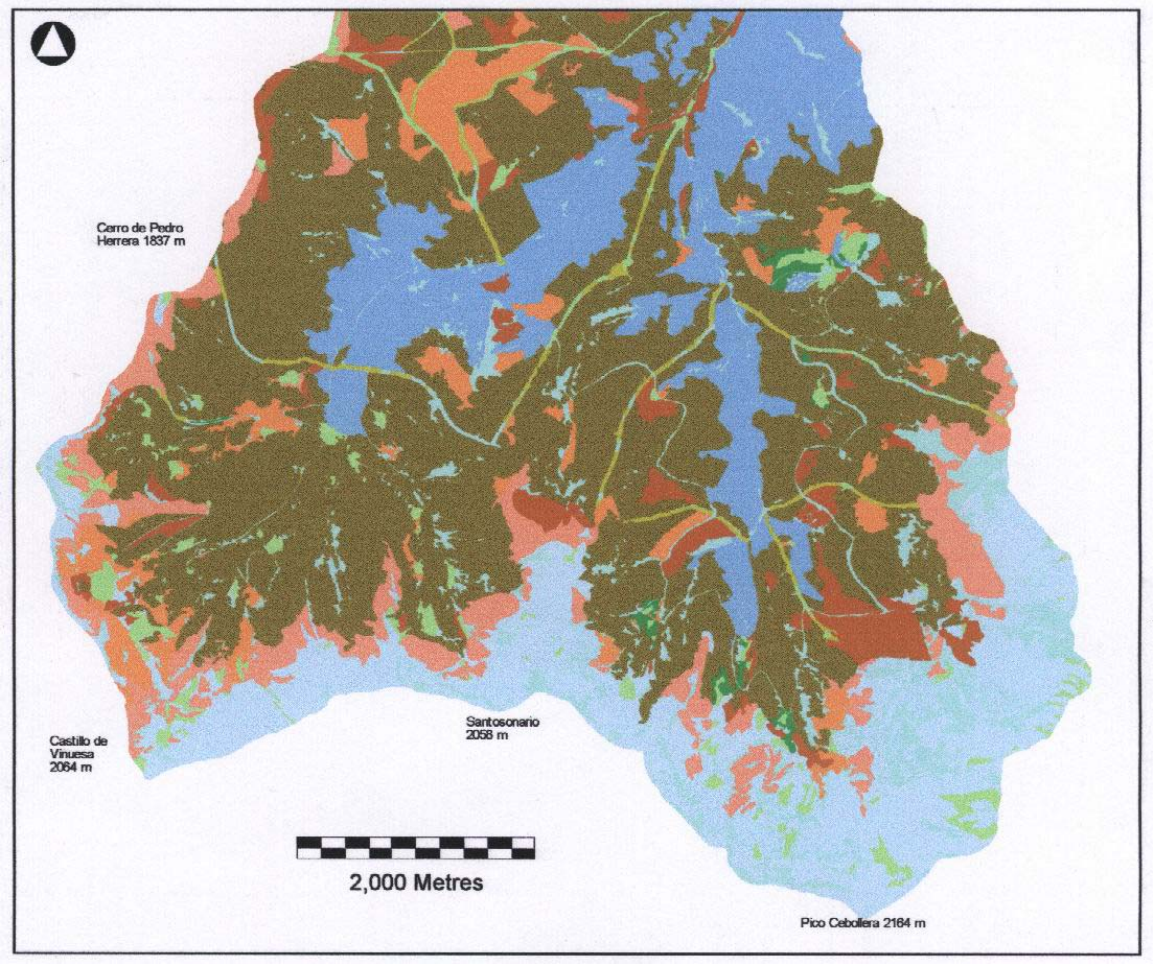
Veget.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	TOTAL
Número de UL	20	10	1	-	-	-	-	-	-	31
Número de pixels	20053	11526	2632	668	266	287	-	1378	2740	39550
Superf. (Ha)	50.13	28.81	6.58	1.67	0.67	0.71	-	3.44	6.85	98.87

1. Bosque denso de coníferas; 2. Bosque denso de caducifolios; 3. Bosque indiferenciado con cubierta entre el 50 y 75%; 4. Bosque indiferenciado con cubierta entre el 25 y 50%; 5. Bosque indiferenciado con cubierta inferior al 25%; 6. Pinos jóvenes en cortafuegos; 7. Matorral; 8. Prados y pastos; 9. Ausencia de vegetación

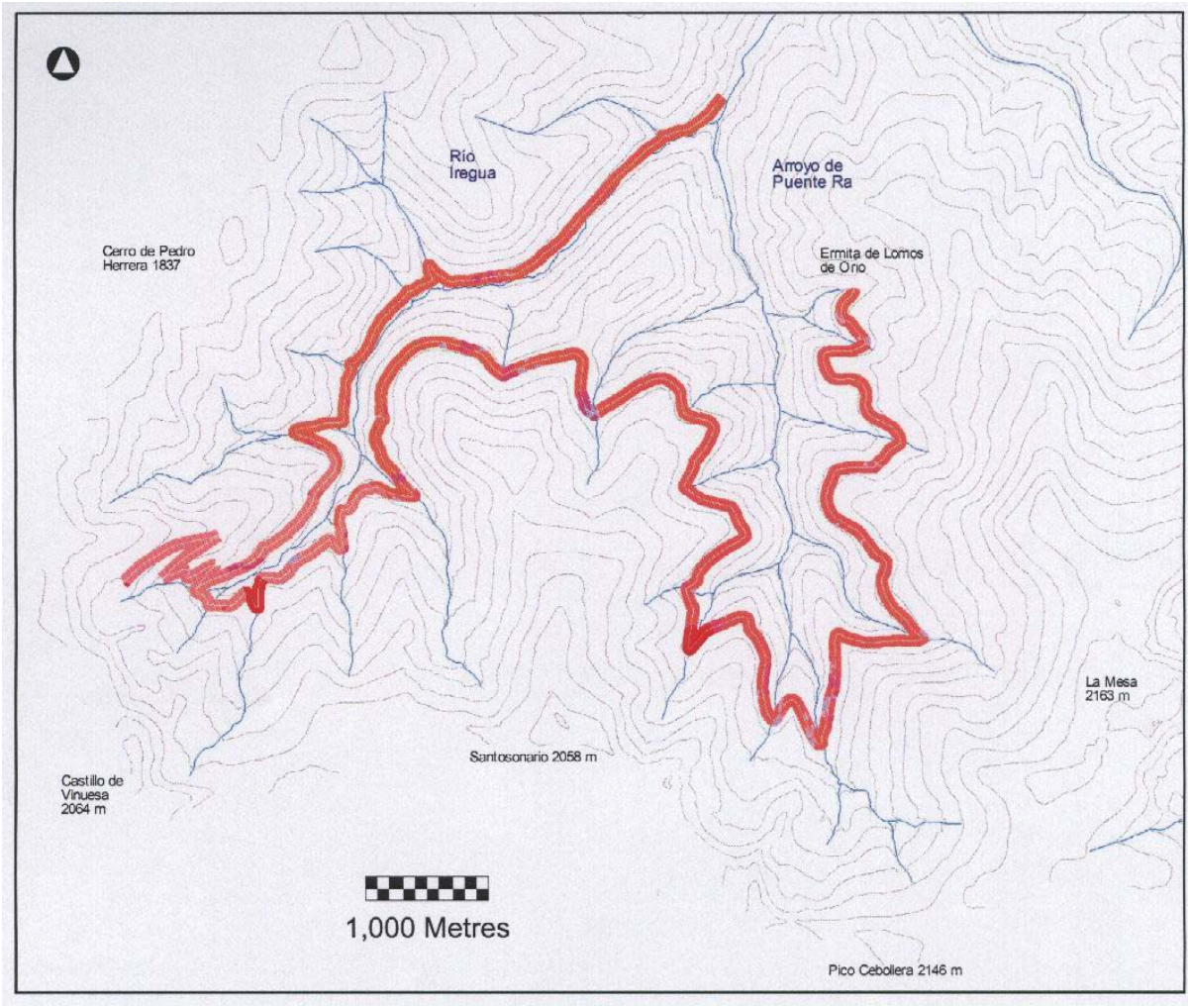
Mapa 5.8. Mapa de distancia media a la red hídrica principal de las celdas de las UL de la banda de 50 m. Pista Hoyos de Iregua-Puente Ra. Parque Natural de la Sierra de Cebollera. Sistema Ibérico noroccidental



Mapa 5.9. Mapa de vegetación y usos del suelo del área de estudio. Parque Natural de la Sierra de Cebollera. Sistema Ibérico noroccidental. La Rioja

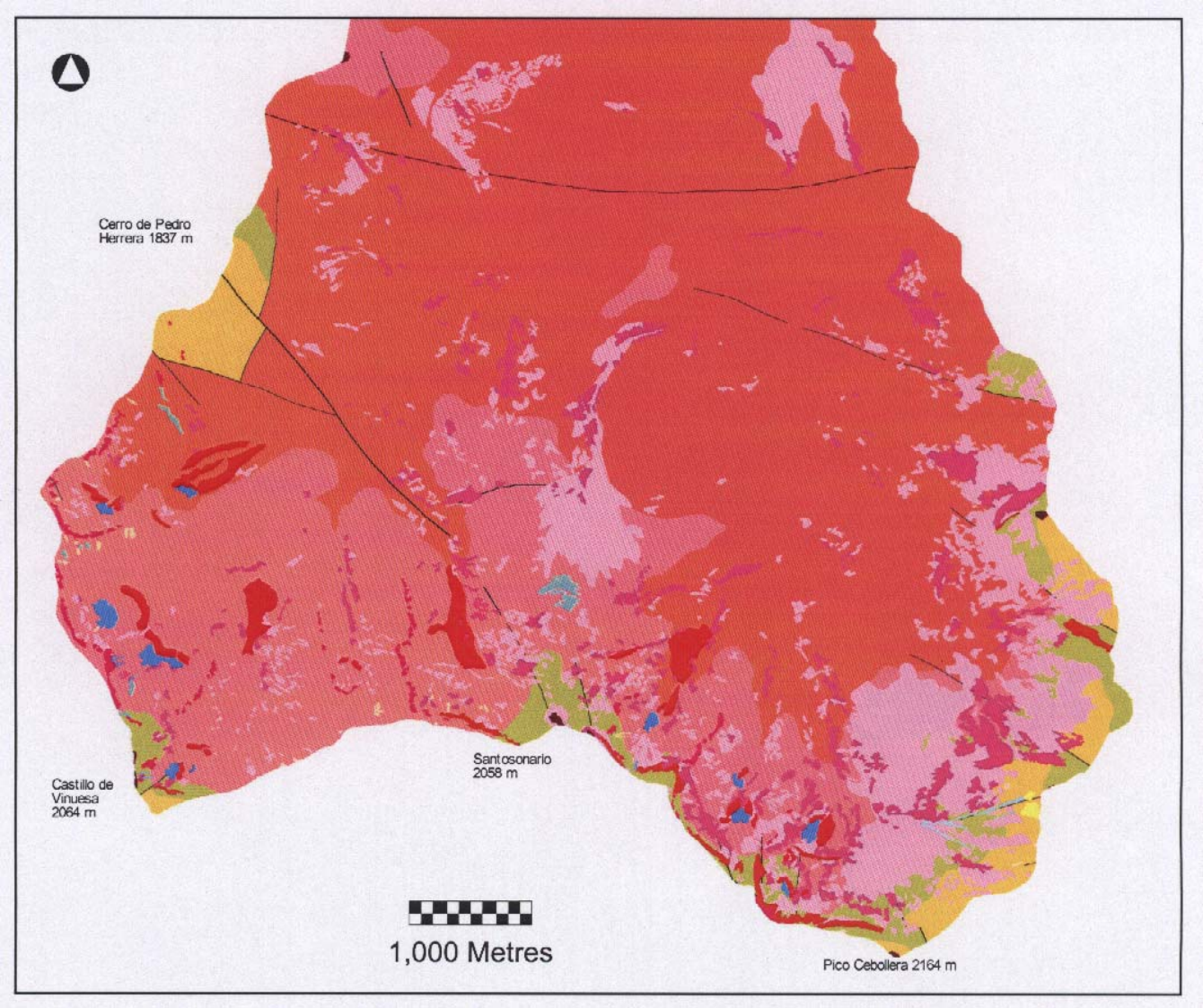


Mapa 5.10. Mapa litológico y geomorfológico correspondiente a la banda de 50 m por encima y debajo de la pista forestal de Hoyos de Iregua-Puente Ra.
Parque Natural de la Sierra de Cebollera.

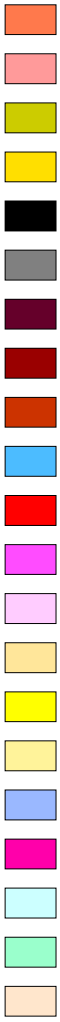


Grupo Oncala. Areniscas
Canchales y derrubios con vegetacion
Canchales sin vegetacion
Areniscas con pelitas
Morrenas
Curvas de nivel de 50 en 50 m.
Rios y arroyos

Mapa 5.11. Mapa litológico y geomorfológico del área de estudio. Parque Natural de la Sierra de Cebollera. Sistema Ibérico noroccidental. La Rioja



Leyenda del mapa litológico y geomorfológico:



G. Oncala. Areniscas
G. Oncala. Areniscas con pelitas
G. Urbion. Conglomerados siliceos
G. Urbion. Areniscas arcosicas con pelitas
Falla
Falla con hundimiento
Anticlinal
Torns
Escarpes
Lagunas y/o tremedales
Morrenas
Canchales sin vegetacion
Canchales y derrubios de ladera
Cicatrices de despegue
Cabeceras activas de barranco
Coladas de barro y piedras
Canales de avalancha
Zonas de innivacion y arranque en cabecera de circo
Barrancos con fuerte incision
Arroyamiento difuso severo
Areas de deflaccion eolica de cumbres

TV (Tramo validación)

Veget.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	TOTAL
Número de UL	31	4	2	-	-	-	-	-	-	37
Número de pixels	36080	7485	6087	1627	-	547	665	1248	9048	62787
Superf. (Ha.)	90.20	18.71	15.22	4.06	-	1.37	1.66	3.12	22.62	156.97

5.3.1.4. Variables litológicas y geomorfológicas

Para el estudio de estas variables se han integrado el mapa geológico y el geomorfológico de la cabecera del Iregua (Mapas 5.10 y 5.11). El primero se ha obtenido a partir de la digitalización del mapa geológico del IGME 1:50.000, hoja de Villoslada de Cameros (279). El segundo se ha elaborado expresamente a partir de la fotografía aérea 1:5.000 (ortoimagen del Gobierno de La Rioja). Para las UL por las que discurre la pista forestal estudiada resulta de especial interés la localización de formas de sedimentación glaciar y periglaciar (morrenas y canchales). No se han apreciado movimientos en masa de grandes dimensiones en las laderas próximas a la pista aunque sí se desarrollan en otras laderas por encima de los 1750-1800 metros.

Tabla 5.64. Distribución de las UL (unidades de ladera) y "pixels" en la pista forestal estudiada según litología y principales formas del relieve para el tramo analizado y el de validación

TA (Tramo analizado)

	1	2	3	4	5	TOTAL
Nº UL	27	12	2	-	-	31
Nº pixels	20243	16799	1402	874	232	39550
Superf. (Ha)	50.60	41.99	3.51	2.19	0.58	98.87

1. Areniscas; 2. Areniscas con arcillas; 3. Morrenas; 4. Canchales semifuncionales (sin vegetación); 5. Canchales no funcionales (con vegetación)

TV (Tramo validación)

	1	2	3	4	5	TOTAL
Nº UL	31	4	2	-	-	37
Nº pixels	53234	2720	1605	2827	2401	62787
Superf. (Ha)	133.09	6.80	4.01	7.06	6.00	156.96

5.3.2. Inestabilidad por movimientos en masa en las unidades de ladera (UL)

En una primera fase se trabajó con las 31 unidades de ladera (UL) del tramo de pista de análisis (TA), aplicando un discriminante para la evaluación de la inestabilidad por movimientos en masa. En una segunda fase, se intentó validar los resultados en 37 UL de otro sector de la pista forestal (tramo de validación, TV).

Las variables consideradas en el análisis discriminante fueron:

- Altitud media de la unidad de ladera (m),
- Pendiente media de la unidad de ladera (%),
- Exposición dominante de la unidad de ladera. Se distinguieron cuatro categorías (norte, sur, este y oeste) que fueron tratadas como variables diferentes en el análisis estadístico.
- Potencial hídrico de la unidad de ladera (mm/m^2/año).
- Distancia al fondo del barranco de la unidad de ladera (m).
- Litología y/o materiales en las unidades de ladera.
- Cubierta vegetal y porcentaje de cubrimiento.

En cada una de las UL se localizaron e inventariaron los movimientos en masa de más de 2 metros de anchura, se incorporaron a la cartografía digital y se calculó el material movilizado por cada 100 metros de pista. Después de un análisis de los datos con estadística descriptiva, se consideraron sectores inestables aquellos que igualaban o superaban el valor medio obtenido en el conjunto de las pistas forestales analizadas (Valgañón-Ezcaray, Hoyos de Iregua y Ocón-Arnedillo): 3 m^3 por cada 100 m de pista. Las unidades con valores inferiores a 3 m^3 por cada 100 m de pista se consideraron poco o nada afectadas por los movimientos en masa y se calificaron en el trabajo como “resto”.

En el análisis discriminante el autovalor obtenido fue 0.872 y la correlación canónica 0.683. La Lambda de Wilks (0.534) no tuvo significación (0.274) pero la función discrimina los centroides de los dos grupos (inestabilidad/”resto”) (-1.137 y 0.718).

Tabla 5.65. Matriz de Estructura del Análisis Discriminante

	Función
Exposición sur	0,413
Materiales morrénicos	-0,384
Exposición norte	-0,320
Pendiente	-0,264
Areniscas	0,258
Exposición oeste	-0,253
Cubierta vegetal	-0,184
Altitud	-0,180
Distancia al talweg	-0,103
Orientación este	-0,083
Areniscas con pelitas	-0,059
Potencial hídrico	-0,036
Canchales	-0,002

La matriz de estructura (correlaciones intra-grupo combinadas entre las variables discriminantes y las funciones discriminantes canónicas tipificadas) ordena las variables por el tamaño de la correlación. Los valores más elevados corresponden a las orientaciones (solana y umbría), materiales (morrenas y areniscas) y pendiente (Tabla 5.65).

El análisis discriminante calificó correctamente el 83.9% de los casos, siendo menos precisa la clasificación correspondiente al "resto" (78.9%) (Tabla 5.66).

Tabla 5.66. Resultados de clasificación general del AD en el tramo de análisis (TA) para el estudio de unidades de ladera (UL)

	Grupo de pertenencia pronosticado		
GRUPO	Inestabilidad	"Resto"	Total
Inestabilidad	11 **91.7%**	1 8.3%	12
"Resto"	4 21.1%	15 **78.9%**	19

Clasificados correctamente el 83.8% de los casos agrupados originales.

En un intento de mejorar el análisis de los datos se recurrió a la regresión logística (RL), técnica estadística que requiere menos restricciones con relación al tratamiento de

las variables independientes que la regresión múltiple o el análisis discriminante (Díaz de Rada, 1994). Con esta técnica se han obtenido similares resultados a los logrados con el AD, con una clasificación correcta del 83.8 % (Tabla 5.67).

Tabla 5.67. Resultados de clasificación general de la RL en el tramo de análisis (TA) para el estudio de las unidades de ladera (UL)

	Grupo de pertenencia pronosticado		
GRUPO	Inestabilidad	"Resto"	Total
Inestabilidad	10 **83.3%**	2 16.7%	12
"Resto"	3 15.8%	16 **84.2%**	19

Clasificados correctamente el 83.8% de los casos agrupados originales.

Finalmente, se procedió a comprobar la probabilidad de pertenencia de todas las unidades de ladera a la categoría de inestabilidad. Utilizando el análisis discriminante, los resultados se plasmaron en una cartografía de probabilidad de inestabilidad (Mapa 5.12) en el que se han distinguido tres categorías con los umbrales más utilizados en la bibliografía (Carrara *et al.,* 1995)

- Taludes y laderas con elevadas probabilidades de riesgo por movimientos en masa (probabilidad de asignación: >0.59).
- Taludes y laderas con escasas probabilidades de riesgo por movimientos en masa (probabilidad de asignación: <0.40)
- Taludes y laderas con incertidumbre (probabilidad de asignación: 0.40-0.59)

Validación del análisis. Una vez comprobado el nivel de acierto de las dos técnicas (análisis discriminante y regresión logística) en las 31 unidades de ladera, se procedió a su validación predictiva. El AD asignó, teniendo en cuenta los datos aportados por el SIG, la categoría correspondiente (inestabilidad/"resto") al tramo de validación (TA) que, como ya se ha indicado con anterioridad, estaba dividido en 37 unidades de ladera (UL).

Para comprobar el grado de acierto de la predicción, posteriormente, se llevó a cabo un minucioso recorrido por el tramo de validación y se anotó la localización exacta con un GPS de los movimientos en masa de más de 2 metros de anchura, así como las medidas básicas de las cicatrices (longitud, profundidad y anchura). Con estos datos se aplicó la fórmula desarrollada para el cálculo de los volúmenes (ver capítulo de métodos) y se estimó el volumen aproximado por cada 100 metros lineales de pista.

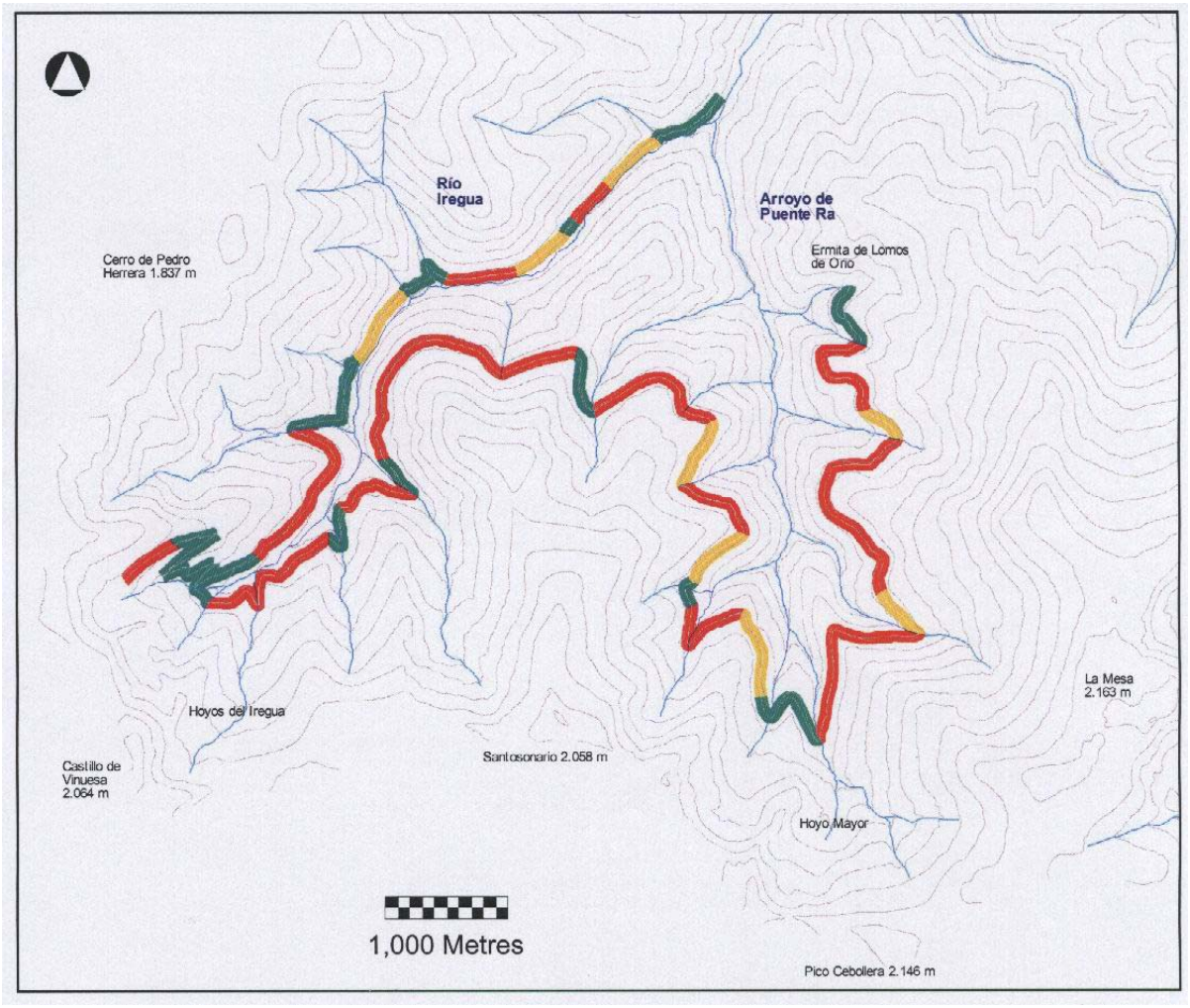
Tabla 5.68. Resultados de clasificación general del AD en los tramos de validación (TV) para el estudio de unidades de ladera (UL)

	Pronosticado		
Observado	Inestabilidad	"Resto"	Total
Inestabilidad	4 **80%**	1 20%	5
"Resto"	21 65.62%	11 **34.37%**	32

Clasificados correctamente el 40.54% de los casos agrupados originales.

Como refleja la tabla 5.68, en general los porcentajes de coincidencia entre los observado y lo pronosticado son bajos. Sin embargo, los resultados parciales son algo más precisos. Así en las unidades de ladera con taludes inestables el AD señala un porcentaje de coincidencia del 80%. Por el contrario, el grado de acierto en las unidades de ladera calificadas como "resto" es muy poco representativo (34.3%). Los datos indican que algunas unidades de ladera no han activado movimientos en masa en las pistas, pero reúnen las condiciones ambientales necesarias para ello. Serían, pues, sectores potencialmente inestables. El carácter excesivamente sintético de los datos (agrupados en unidades de ladera) y la no utilización de más variables condicionantes, directamente implicadas en la estabilidad del suelo o relativas a las características de la pista, justifican la imprecisión del método de clasificación que debe ser considerado con muchísima prudencia.

Mapa 5.12. Mapa de probabilidad de inestabilidad por movimientos en masa en la pista Hoyos de Iregua-Puente Ra a partir de las 68 UL. Parque Natural de la Sierra de Cebollera.



U.L. estables.	Probabilidad	< 0.4
U.L. de incertidumbre.	"	>= 0.4 < 0.6
U.L. inestables.	"	> = 0.6
Rios y arroyos de montana		
Curvas de nivel de 50 en 50 m		

5.3.3. Riesgo de erosión por movimientos en masa en pistas forestales

Con el objeto de encontrar un método de análisis algo más preciso se optó por considerar la información individualizada que aportaba cada una de las celdas o "pixels" de las bandas de 25 metros aguas arriba y aguas abajo de la calzada de la pista. La elección de esta reducida franja vino exigida por el mayor detalle del análisis y por el hecho de que la mayor parte de los movimientos en masa se activan en los taludes o en la estrecha franja que ocupa sus inmediaciones. La resolución ofrecida por los "pixels" fue de 5x5 m y el total de celdas manejadas se elevó a 20.984 en el caso del tramo de análisis (TA) y 32.243 en el tramo de validación (TV).

Tabla 5.69. Variables incorporadas a la evaluación del riesgo en la pista Hoyos de Iregua en el análisis de celdas o "pixels"

Factores considerados	Valores	Variables (valor)
Pendiente (%)		Continuo
Potencial hídrico (l/píxel/año)		Continuo
Vegetación	0-8	0. Ausencia de vegetación; 1. Prados y pastos; 2. Matorral alto; 3. Pinos jóvenes en cortafuegos; 4. Bosque <25% cubri.; 5. Bosque 25-50%; 6. Bosque 50-75%; 7. Bosque >75% Haya; 8. Boque >75% Pino
Litología	1-5	1. Areniscas; 2. Canchales con veg.; 3. Canchales sin veg.; 4. Areniscas con arcillas; 5. Morrenas
Exposición	1-4	1. Sur; 2. Este; 3. Oeste; 4. Norte
Distancia al río (m)		Continuo
Distancia a la calzada (m)		Continuo

Las variables consideradas para el análisis discriminante fueron prácticamente las mismas que en el caso de las unidades de ladera (UL), aunque su tratamiento sufrió algunas pequeñas modificaciones dadas las dimensiones de la base de datos y el análisis de detalle exigido. Los factores cuantitativos incluidos fueron la pendiente de cada celda,

su potencial hídrico, su distancia a los fondos de barranco y su distancia a la calzada de la pista. Con esta última variable se pretendió conocer el comportamiento de las celdas más próximas a la propia pista. Los factores de carácter cualitativo se codificaron. La exposición de cada celda se mantuvo dividida en cuatro valores básicos (norte, oeste, este y sur) jerarquizados según su capacidad para retener más humedad. La cubierta vegetal tuvo un doble tratamiento, pues incluía información sobre el tipo de cubierta y, en el caso de las masas boscosas, el porcentaje de cubrimiento. En ambos casos se consideró su capacidad de retención del suelo. Por último, la litología fue codificada atendiendo a su cohesión interna y resistencia a la erosión.

El análisis discriminante exigió delimitar el valor indicativo de la inestabilidad de cada "píxel". Se utilizó el mismo criterio que en el caso de las unidades de ladera (UL), de modo se consideró como inestable toda aquella celda que presentase un volumen de material movilizado igual o superior a la media de las pistas estudiadas, es decir 3 m^3 por cada 100 metros de pista (0,15 m^3 por cada 5 metros de pista).

El análisis discriminante muestra un autovalor de 0.008, una correlación canónica de 0.087 y una elevada Lambda de Wilks (0.992). La prueba M de Box y su transformación en un estadístico F permite rechazar la hipótesis de igualdad de las matrices de varianzas-covarianzas (Sig. = .000) y concluir que los grupos considerados no poseen la misma variabilidad.

Tabla 5.70. Matriz de Estructura del Análisis Discriminante para el estudio de "pixels"

	Función
Distancia a la pista	0.783
Vegetación	0.342
Litología	-0.286
Exposición	-0.223
Distancia a la red fluvial	-0.199
Pendiente	-0.130
Potencial hídrico	-0,100

La matriz de estructura (tabla 5.70) ordena por importancia la correlación entre las variables y la función discriminante. La variable con mayor poder discriminante es la distancia de la celda a la calzada de la pista forestal indicativa de que los movimientos en

masa se producen en los taludes y sus inmediaciones. Siguen en orden de importancia variables ambientales como la cubierta vegetal y la litología.

Los centroides de los grupos están suficientemente separados (-1.320 y 0.057). El AD es capaz de clasificar correctamente el 73% de los casos conocidos y procesados por el sistema, así como de enmarcar correctamente 78 de las 91 celdas inestables (85.7 %) (Tabla 5.71).

Tabla 5.71. Resultados de clasificación general del AD en el tramo de análisis (TA) para el estudio de "pixels"

	Grupo de pertenencia pronosticado		
GRUPO	Inestabilidad	"Resto"	Total
Inestabilidad	78 **85.7%**	13 14.3%	91
"Resto"	5656 27.1%	15237 **72.9%**	20893

Clasificados correctamente el 73% de los casos agrupados originales.

A partir del análisis estadístico se pudo plasmar en el espacio, al igual que se hizo con el análisis de UL, las probabilidades de adscripción de cada celda al grupo de inestabilidad. En el mapa 5.13 se muestran las zonas que han obtenido una probabilidad de adscripción inferior al 0.40 (escasas probabilidades de desarrollo de movimientos en masa), entre 0.40 y 0.59 (zonas indiferenciadas o de incertidumbre) y más de 0.59 (elevadas probabilidades de movimientos en masa).

Si se observa el mapa 5.13, se constata que en los primeros kilómetros, por debajo de los 1350 m de altitud, se alternan diferentes niveles de probabilidad de inestabilidad por movimientos en masa. A partir de los 1350 m los canchales, los afloramientos rocosos del substrato y el desarrollo de laderas orientadas al norte, con fuerte pendiente, condicionan una elevada probabilidad de activación de los procesos. Una vez se adentra la pista por altitudes superiores a los 1500 m, la inestabilidad se eleva y se hace más continuada hasta alcanzar los valores máximos en los materiales morrénicos. Los substratos arcillosos del tramo más alto de la pista también destacan por su elevada probabilidad de movimientos en masa. Al incluir en el análisis estadístico como variable

la distancia de las celdas a la calzada de la pista, se observa una menor probabilidad de activación de movimientos en masa en los sectores más alejados de la misma.

La determinación de la inestabilidad exige definir un umbral a partir del cual enmarcar un "píxel" en esta categoría. En nuestro caso ya se ha visto que, basándonos en la experiencia obtenida en el trabajo de campo y en la visualización de un buen número de pistas forestales, este umbral podría marcarlo el volumen medio desplazado en los movimientos en masa estudiados. Sin embargo, este análisis no contempla los casos más extremos. Por ello se ha creído conveniente, en un siguiente paso, establecer y aplicar de nuevo el análisis discriminante a tres grupos de movimientos en masa: inferiores 0.15 m^3 por 5 metros de pista (valor inferior a la media), entre 0.15 y 14 m^3 (entre la media y el percentil 75) y más de 14 m^3 (por encima del percentil 75). Esta distinción hace que se observen interesantes matices y el análisis discriminante ofrece un porcentaje del 63.3% de los casos bien clasificados (Tabla 5.72).

Tabla 5.72. Resultados de clasificación general de la AD en el tramo de análisis (TA) para el estudio de "pixels" considerando el volumen de material movilizado (m^3 por 5 metros de pista)

	Grupo de pertenencia pronosticado			
GRUPO	<0.15	0.15-14	> 14	Total
<0.15	13221 **63.2%**	4172 20.0%	3500 16.8%	20893
0.15-14	2 4.3%	36 **76.6%**	9 19.1%	47
> 14	3 6.8%	15 34.1%	26 **59.1%**	44

Clasificados correctamente el 63.3% de los casos agrupados originales.

En el mapa 5.14 las celdas con mayor riesgo de movilizar volúmenes elevados aparecen en vaguadas expuestas al norte, con fuerte pendiente, por encima de los 1500 m, y ocupando canchales o zonas morrénicas próximas a los barrancos.

La combinación de la cartografía de la probabilidad de inestabilidad otorgada por el AD y del mapa de nivel de riesgo según el tamaño o volumen del material movilizado nos permite dibujar un mapa que podría calificarse como de riesgo definitivo (Mapa 5.15). Este mapa incorpora cuatro categorías:

I. Riesgo bajo. Muy baja probabilidad de inestabilidad y procesos inexistentes o muy pequeños.

II. Riesgo medio. Probabilidad media de inestabilidad y procesos pequeños (movilización de material por debajo de 0.15 m^3/5 metros de pista) y medianos (movilización de material entre de 0.15 m^3 y 14 m^3/5 metros de pista).

III. Riesgo alto. Probabilidad alta de inestabilidad con procesos de tamaño medio (movilización de material entre 0.15 y 14 m^3 /5 metros de pista) y probabilidad de inestabilidad media-baja de movimientos en masa grandes (movilización de material por encima de los 14 m^3/5 metros de pista).

IV. Riesgo muy alto-zonas críticas. Alta probabilidad de inestabilidad y procesos de gran tamaño (material movilizado por encima de los 14 m^3/5 metros) que afectan tanto al corte-talud (T1) como al talud inferior (T2).

Este último mapa refuerza lo dicho hasta el momento. El nivel de riesgo máximo se da allí donde se conjugan tres variables determinantes: litologías favorecedoras de movimientos en masa (materiales morrénicos, canchales o derrubios de ladera), proximidad a los fondos de barranco y vaguadas donde se acumulan las escorrentías y se modifican los niveles freáticos, y exposiciones húmedas (norte, oeste, o intermedias). Estos ambientes se dan en el tramo alto de la pista de Hoyos de Iregua y en el tramo suroccidental de la pista de Puente Ra, tramos donde la fusión nival aporta una gran humedad al suelo.

Validación del análisis. Para la validación del modelo predictivo obtenido mediante el análisis discriminante aplicado a las celdas se utilizó el tramo de pista de validación (TV) en el que se localizaron, cartografiaron y midieron los movimientos en masa. El volumen movilizado por estos procesos fue calculado a partir de la fórmula desarrollada en capítulos anteriores.

Seguidamente se determinó el nivel de acierto o coincidencia entre las predicciones proyectadas para cada celda y el desplazamiento de material observado. De este modo se obtuvo una coincidencia en el 66.6% de los procesos (24 casos de los 36 observados).

El porcentaje descendió al comparar los volúmenes calculados por el modelo y los observados en la realidad. De hecho sólo coinciden el 58.3% de los casos (21 de los 36 observados) (Tablas 5.73 y 5.74). Las coincidencias son más abultadas en los movimientos en masa calificados de tamaño medio y son algunos de estos los que reúnen, tal y como señala el análisis, condiciones para ser enmarcados en la categoría de movimientos en masa de grandes dimensiones.

Tabla. 5.73. Resultados de inestabilidad obtenidos al aplicar el modelo predictivo al tramo de validación (TV)

Coincidencias	Error	Total
24 **66.6%**	12 33.33%	36

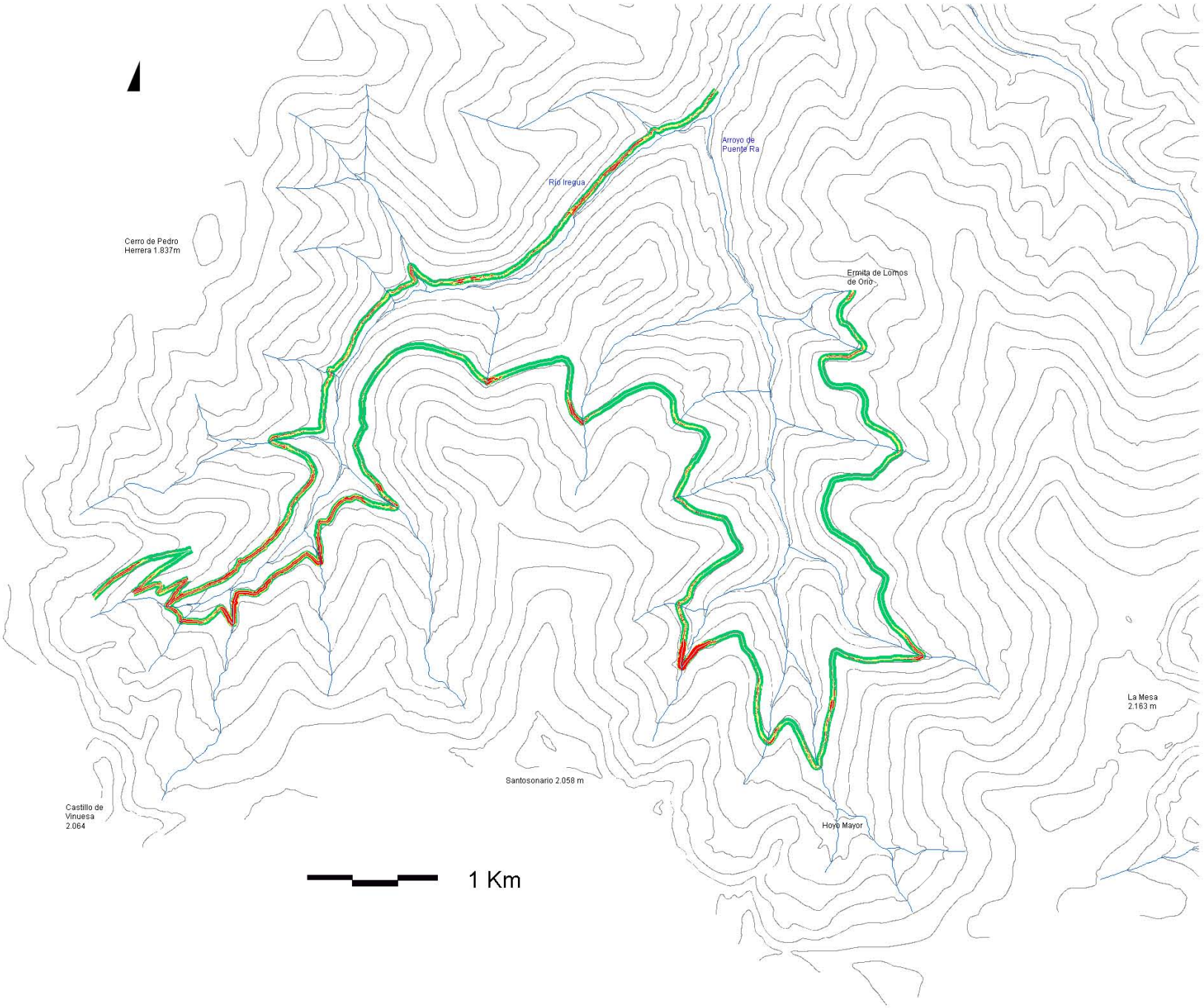
Tabla 5.74. Resultados obtenidos del volumen de material movilizado al aplicar el modelo predictivo al tramo de validación (TV)

	Pronosticado			
Observado	<0.15	0.15-14	>14	Total
<0.15	**-**	-	-	-
0.15-14	1 3.2%	18 **58.0%**	12 38.7%	31
>14	-	2 40%	3 **60%**	5

Clasificados correctamente el 58.3% de los casos agrupados originales.

3.4. Conclusiones y valoración de los resultados

Las pistas forestales son causantes de la ruptura del perfil de la ladera. Sus taludes y áreas próximas de las laderas se convierten en zonas potencialmente erosionables. En las pistas forestales de nuestra zona de estudio los movimientos en masa son procesos activos que dificultan el uso de la pista y, más excepcionalmente, pueden ocasionar

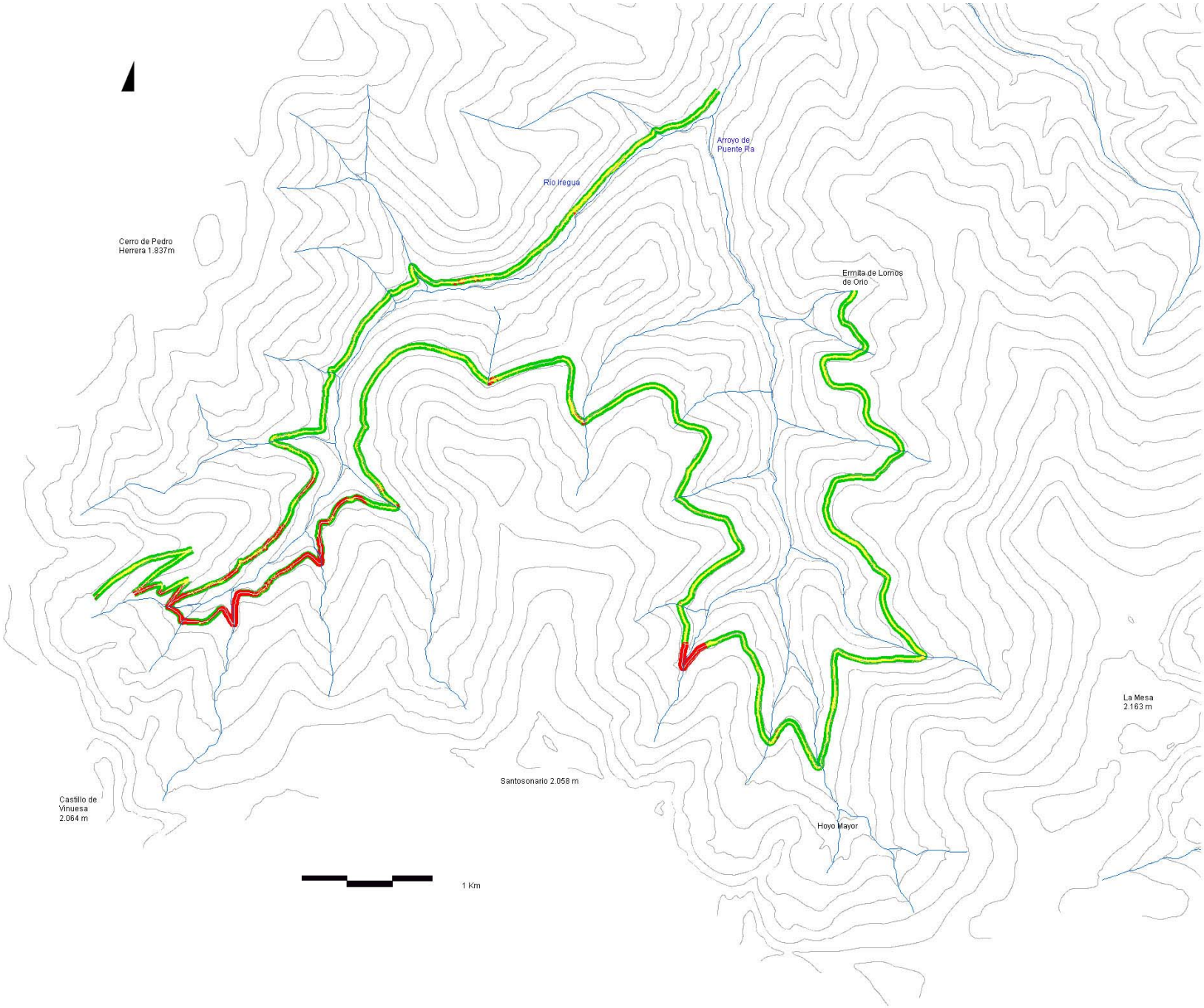


Mapa 5.13. Mapa de probabilidad de Inestabilidad por movimientos en masa en la pista Hoyos de Iregua-Puente Ra. Parque Natural de la Sierra de Cebollera. Sistema Ibérico noroccidental. La Rioja

Probabilidad baja < 0,4

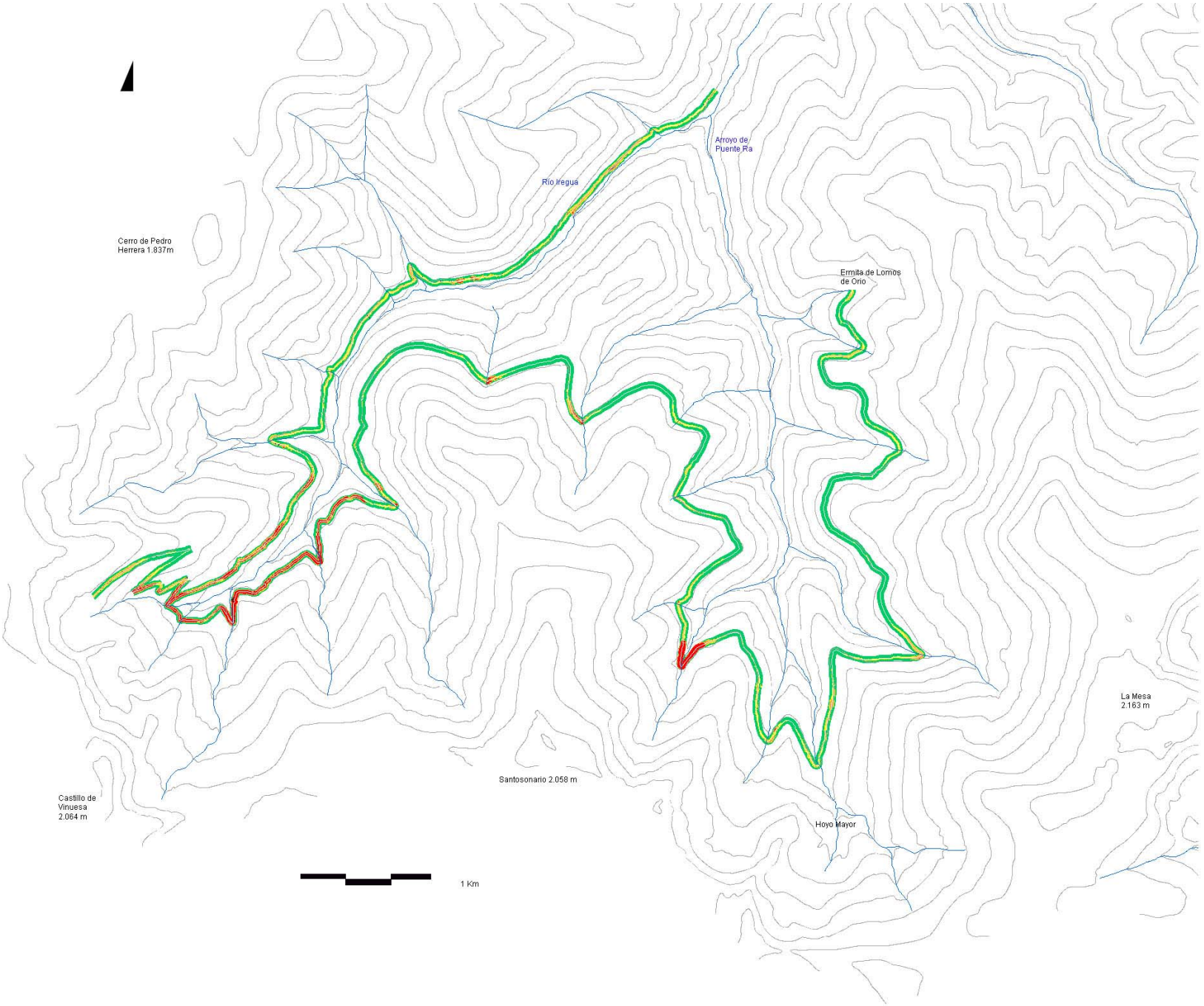
Probabilidad media 0,4 < 0,6

Probabilidad alta >= 0,6



Mapa 5.14. Mapa de riesgo por movimientos en masa en la pista Hoyos de Iregua-Puente Ra a partir del volumen movilizado. Parque Natural de la Sierra de Cebollera. Sistema Ibérico noroccidental. La Rioja

- Resto o microprocesos <0.15m3 / 5 m de pista
- Procesos de 0.15 - 14 m3 / 5 m de pista
- Procesos > 14 m3 / 5 m de pista



Mapa 5.15. Mapa definitivo de riesgo por movimientos en masa en la pista Hoyos de Iregua-Puente Ra. Parque Natural de la Sierra de Cebollera. Sistema Ibérico noroccidental. La Rioja

- Riesgo I
- Riesgo II
- Riesgo III
- Riesgo IV
- Movimientos en masa Trama A
- Movimientos en masa Tramo B (Validación)

algunos accidentes.

La utilización de sistemas de información geográfica y análisis estadísticos multivariables puede ser de gran utilidad para gestionar adecuadamente estas pistas. En nuestro estudio se ha pretendido realizar una aproximación a la confección de cartografías de inestabilidad y riesgo por movimientos en masa. Los resultados obtenidos hay que asumirlos con prudencia, siendo más acertado el análisis llevado a cabo con la información aportada por los pixels situados 25 metros aguas arriba y aguas debajo de la calzada de la pista que con el método de las unidades de ladera. Con toda seguridad los modelos podrán ajustarse más adecuadamente en el futuro si se trabaja en dos líneas: la incorporación al análisis de un mayor número de variables, especialmente aquellas que están relacionadas con las características de los suelos o de los substratos, y la mejora en la resolución de las imágenes de satélite y ortoimágenes. El uso de SIG's, programas de simulación y ordenadores potentes permitirá combinar mayores cantidades de información. De este modo, se podrán construir auténticos mapas de evaluación del riesgo que incorporen no sólo la dimensión espacial sino también la temporal.

Los resultados presentados en este trabajo deben de ser considerados como un primer ensayo de estas metodologías que, sin duda, ayudarán a la planificación y diseño de carreteras de montaña.

MODELOS DE EROSIÓN EN PISTAS FORESTALES

En el capítulo anterior se han explicado los microambientes geomorfológicos y procesos de erosión que se observan en los diferentes sectores de las pistas forestales: cortes-taludes (T1), taludes inferiores (T2) y calzadas. Se hace necesario en este apartado establecer unos modelos de evolución que contemplen a la pista forestal de una forma más integrada tanto desde el punto de vista geomorfológico como hidrológico. Para lograr este objetivo se han seleccionado los procesos indicativos de una erosión severa (arroyamiento difuso severo y deslizamientos) y han sido sometidos a un método estadístico de clasificación (análisis de conglomerados o "cluster k-means"). Un posterior análisis discriminante ha refrendado esta clasificación al dar por correctamente asignados el 71.5% de los casos.

6.1. Tipos de modelos

El análisis de conglomerados ha distinguido tres modelos diferentes:

El **MODELO 1** es el más repetido, ya que incluye el 57% de los casos. Está caracterizado por una **erosión moderada** tanto en el corte-talud (T1) como en el talud inferior (T2). La superficie ocupada por deslizamientos y arroyamiento difuso severo es de un 14.4% y 3.1%, en el primer caso, y de un 4.2% y 8.4% en el talud inferior (Fig. 6.1). Los procesos más repetidos, pues, son los deslizamientos en el talud superior (T1). El material procedente de los mismos queda almacenado al pie de los nichos de despegue y difícilmente alcanza el talud inferior (T2), que se muestra mejor conservado.

Tabla 6.1. Valores medios de algunas características de las laderas y taludes en las pistas correspondientes al MODELO 1

Altitud media (m)	1246
Pendiente de la ladera (º)	19.2
Angulo T1 (º)	47.2
Angulo T2 (º)	34.5
Altura T1 (m)	2.0
Altura T2 (m)	2.2
Longitud T1 (m)	2.7
Longitud T2 (m)	3.8

Los tramos incluidos en este modelo se localizan en laderas cubiertas de bosque y en pistas donde la recolonización vegetal de los taludes ha sido importante: 70% en el talud inferior (T2). Las características de las laderas y taludes de este modelo se encuentran reflejadas en la tabla 6.1. Más de la mitad de los casos pertenecen al sector occidental del Sistema Ibérico (Sierra de la Demanda y alto valle del Iregua) (Tabla 6.2).

Tabla 6.2. Distribución de los modelos geomorfológicos desarrollados en pistas forestales

PISTA	MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3
P1	29.4%	0	0
P2	20.5%	6.2%	11.0%
P3	11.7%	6.2%	0%
P4	8.8%	18.7%	33.3%
P5	5.8%	18.7%	33.3%
P6	5.8%	43.1%	0%
P7	17.6%	6.2%	22.2%

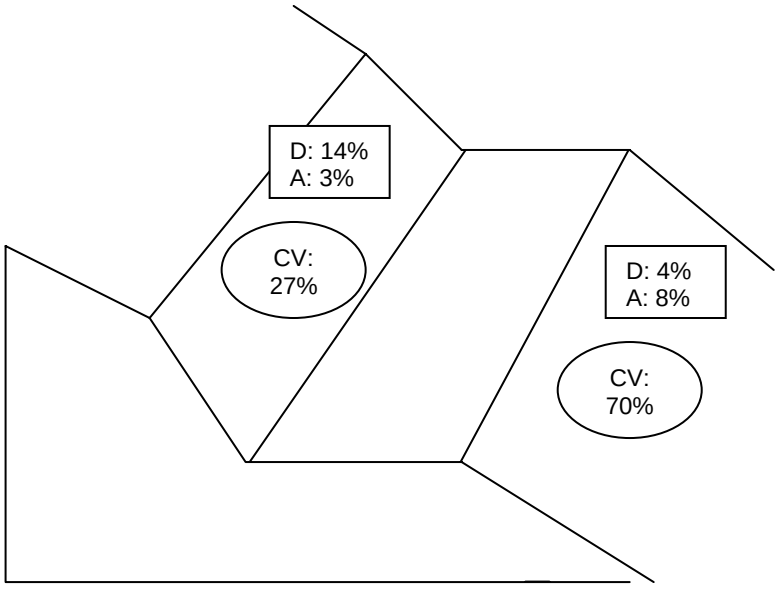


Fig. 6.1. Distribución de procesos de erosión y porcentaje de cubierta vegetal en los taludes de las pistas correspondientes al MODELO 1. D: Deslizamientos. A: Arroyamiento difuso severo e incisiones. CV: Cubierta vegetal.

El **MODELO 2 (erosión grave)** agrupa a 16 casos (27.1%) y se caracteriza por el predominio del arroyamiento difuso severo en T2, que se ve afectado en un 72.6% de su superficie. También destaca el papel de los deslizamientos en T1, con un 23.1% de talud afectado (Fig. 6.2). Este modelo presenta importantes problemas de erosión que dificultan el cubrimiento vegetal. La importancia del arroyamiento superficial en el talud inferior está correlacionada con el bajo porcentaje de cubierta vegetal: 18%. Más del 50% de los casos se encuentran en las pistas más orientales (Zenzano, Sta. Marina, Sierra de Alcarama), en laderas con substrato rocoso arcilloso (Tabla 6.2). Las características de las laderas y taludes donde se localiza el MODELO 2 puede consultarse en la Tabla 6.3

Tabla 6.3. Valores medios de algunas características de las laderas y taludes en las pistas correspondientes al MODELO 2

Altitud media (m)	1026
Pendiente de la ladera (º)	19.7
Angulo T1 (º)	39.8
Angulo T2 (º)	33.9
Altura T1 (m)	2.6
Altura T2 (m)	3.8
Longitud T1 (m)	4.0
Longitud T2 (m)	6.8

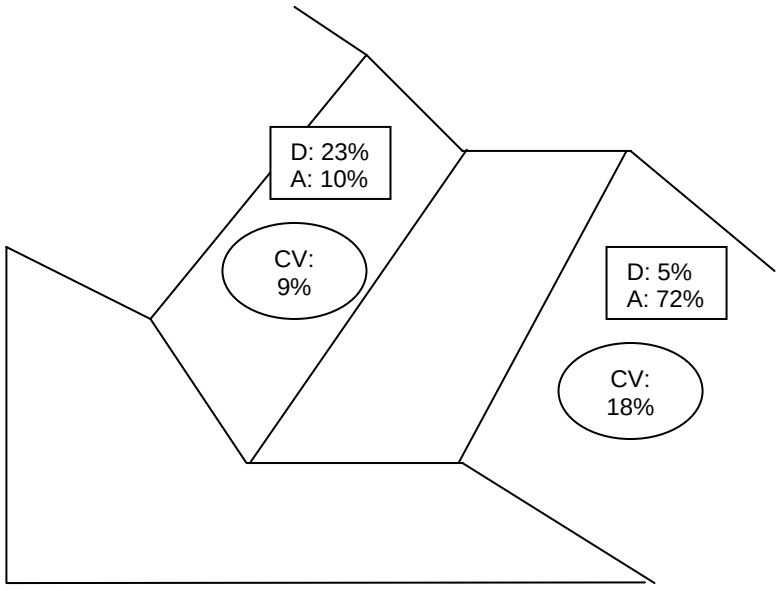


Fig. 6.2. Distribución de procesos de erosión y porcentaje de cubierta vegetal en los taludes de las pistas correspondientes al MODELO 2. D: Deslizamientos. A: Arroyamiento difuso severo e incisiones. CV: Cubierta vegetal.

El **MODELO 3 (erosión grave, con especial incidencia en el corte-talud)** incluye 9 casos (15.2%) en los que destaca el arroyamiento difuso severo en el corte-talud (T1), con un 65.8% de la superficie afectada. Los deslizamientos quedan en un segundo plano. La importancia del arroyamiento difuso severo se reduce en el talud inferior (36.6%), donde la superficie de cubierta vegetal es más importante (51.4%) (Fig. 6.3). Los valores medios de algunas de las características de las laderas y taludes de este modelo aparecen recogidas en la tabla 6.4.

Tabla 6.4. Valores medios de algunas características de las laderas y taludes en las pistas correspondientes al MODELO 3

Altitud media (m)	1149
Pendiente de la ladera (º)	13.7
Angulo T1 (º)	36.5
Angulo T2 (º)	32.8
Altura T1 (m)	1.8
Altura T2 (m)	2.4
Longitud T1 (m)	3.1
Longitud T2 (m)	4.5

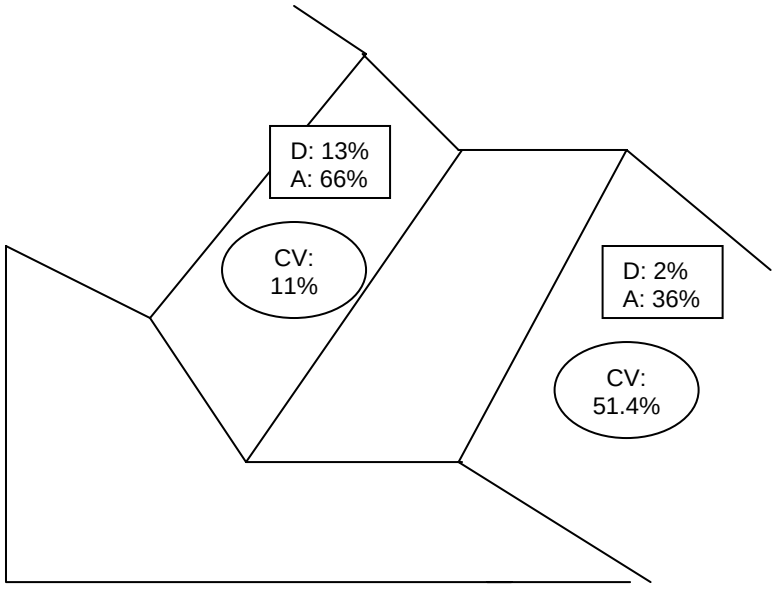


Fig. 6.3. Distribución de procesos de erosión y porcentaje de cubierta vegetal en los taludes de las pistas correspondientes al MODELO 3. D: Deslizamientos. A: Arroyamiento difuso severo e incisiones. CV: Cubierta vegetal.

6.2. Los modelos y su funcionamiento integrado

El conocimiento de los factores más decisivos en el desarrollo de los procesos de erosión explicados en los capítulos anteriores, y el establecimiento y caracterización de tres modelos de evolución geomorfológica en las pistas analizadas aportan suficiente información para intentar describir, desde una perspectiva sistémica, y a modo de resumen, cómo actúan y cómo se interrelacionan los procesos de erosión más graves detectados en las pistas forestales.

Una pista forestal puede ser analizada como un sistema integrado por tres subsistemas muy interrelacionados: el correspondiente al corte-talud (T1), a la calzada de la pista y al talud inferior (T2) (Fig. 6.4).

6.2.1. Subsistema del corte-talud (T1)

En las pistas integradas en los MODELOS 1 y 2 la escorrentía predominante en la ladera es la subsuperficial o subcortical (Carson & Kirkby, 1972; Chorley, 1978; Dunne, 1978; Dunne & Leopold, 1978; Kirkby, 1988). Las características de los materiales (mantos de derrubios o rocas muy permeables) facilitan la circulación del agua en los primeros centímetros del suelo. Ésta, al encontrarse con el corte-talud de la pista (T1), emerge al exterior humedeciendo el propio talud. En algunos casos incluso la pista deja ver, sobre todo en la estación invernal y primaveral (periodos de fusión), un nivel freático muy elevado.

Estos taludes saturados están afectados por la acción de una amplia gama de movimientos en masa tanto de pequeño tamaño (reptación, caída de tepes, etc.) como de grandes dimensiones (deslizamientos o coladas de barro). En los estudios de campo se han catalogado deslizamientos de diferentes tamaños, algunos muy pequeños y otros de proporciones importantes con movilización de material por encima de los 100 m^3. La media de material movilizado ha sido calculada en 9-10 m^3. Los movimientos en masa dificultan la circulación de vehículos y obligan a un gasto permanente de mantenimiento de la pista. En zonas muy activas e inestables, se activan coladas de barro y deslizamientos en taludes muy saturados.

Los controles más decisivos para la activación de estos procesos han sido los materiales (litologías, derrubios y/o suelos) que la pista secciona, especialmente si éstos son muy inestables (morrenas y canchales, por ejemplo), y las características de

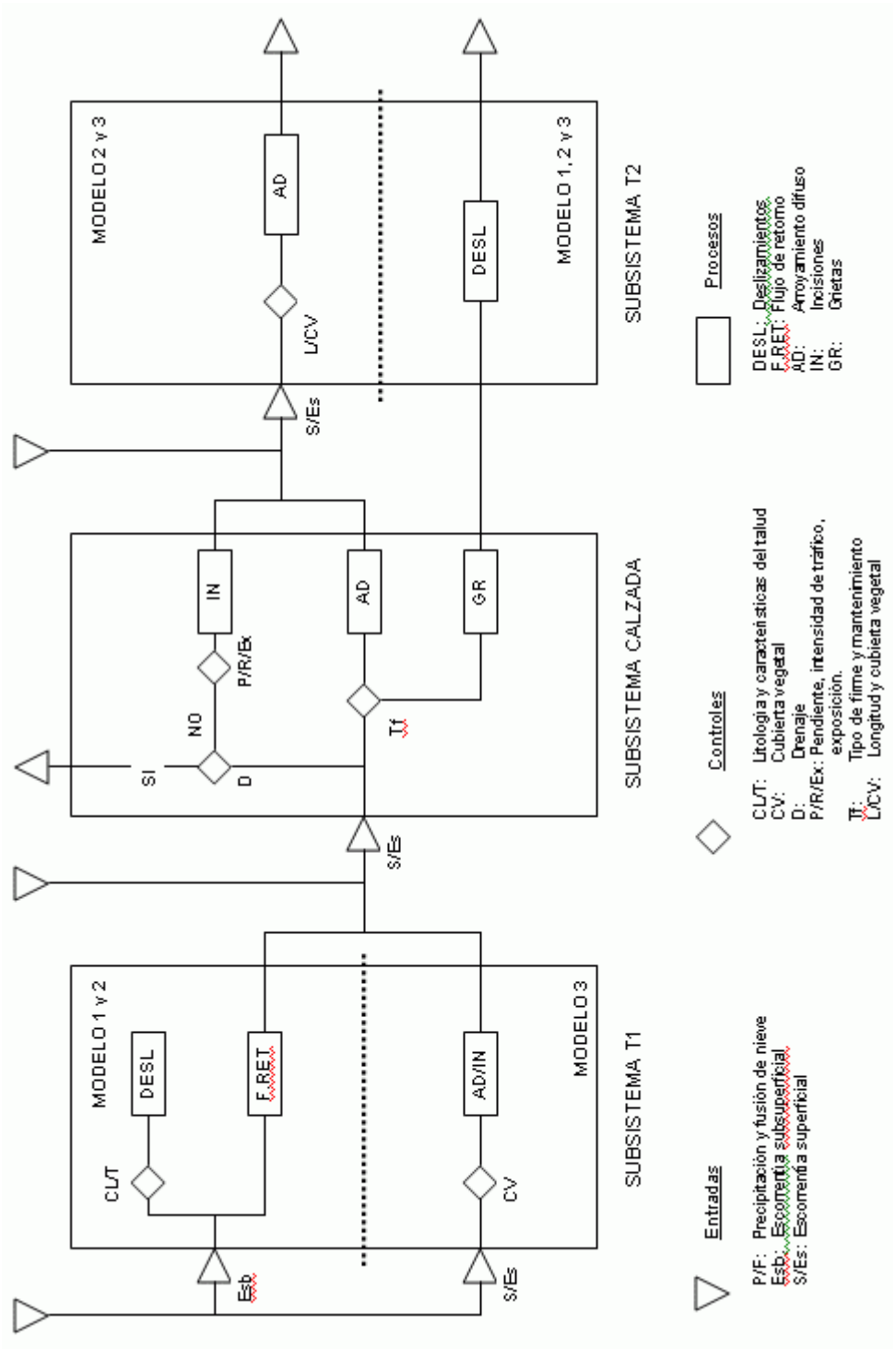


Figura 6.4. Esquema de funcionamiento hidrogeomorfológico del sistema pista con sus tres subsistemas.

los taludes (longitud, altura y ángulo). Los derrubios procedentes de los movimientos en masa quedan en parte almacenados al pie del talud, interceptando los canales de drenaje y esperando a ser transportado para salir del sistema.

Excepcionalmente, se han desarrollado en algunos cortes-taludes zonas críticas con grandes movimientos en masa que se repiten aguas abajo, en el talud inferior. Los tramos más críticos se encuentran en sectores con materiales poco consolidados seccionados por la pista, en áreas donde se concentran grandes cantidades de escorrentía, especialmente la subsuperficial, y en laderas que previamente a la instalación de la pista ya eran muy inestables y registraban deslizamientos o grandes desprendimientos.

El agua que satura el corte realizado para la construcción de la pista (T1) pasa a convertirse en algunos sectores en escorrentía superficial de saturación (Dunne, 1978). En otros este mismo corte intercepta la circulación de "pipes". En consecuencia, se dispone de escorrentía superficial que se encarga de activar, si ciertos controles no lo impiden (cubierta vegetal, principalmente), el arroyamiento difuso severo y las incisiones, aunque éstos son procesos muy secundarios en los MODELOS 1 y 2 si se comparan con los deslizamientos o los microprocesos de erosión.

En pistas construidas sobre materiales más impermeables (MODELO 3) actúa el impacto de las gotas de lluvia y la escorrentía superficial procedente de los sectores superiores de la ladera. Dicha escorrentía produce en los cortes-taludes (T1), con escaso o nulo cubrimiento vegetal y fuerte pendiente, arroyamiento difuso severo e incisiones. La evolución de la escorrentía en estos sectores ha sido estudiada a través de simulaciones de lluvia. Su respuesta es casi inmediata con un tiempo de respuesta (intervalo de tiempo transcurrido entre comienzo de la precipitación y la escorrentía) de apenas unos minutos (172 segundos). Hay poca infiltración, pues los coeficientes de escorrentía medios alcanzan el 57.8% y en algunas pruebas superan el 80%. La respuesta erosiva es elevada si se compara con los otros subsistemas de las pistas o con otros ambientes o usos del suelo. En algunos taludes la concentración de sedimentos en suspensión supera los 400 g m^{-2}, coincidiendo con un alto coeficiente de escorrentía, fuertes gradientes y una escasa cubierta vegetal. Los valores medios han sido calculados en 160 g m^{-2}.

6.2.2. Subsistema de la calzada de la pista

La escorrentía superficial procedente del corte-talud (T1) puede alcanzar la superficie de la pista. El primer control que interviene en este sector son los sistemas de reconducción del agua, es decir los drenajes construidos en las cunetas interiores, al pie del talud superior, o transversalmente a la pista (superficiales o subterráneos). Si están bien diseñados y se les aplica un mantenimiento adecuado, los drenajes se encargarán de evacuar el agua procedente de la ladera y del talud fuera del sistema.

La inexistencia de estos drenajes o su funcionamiento defectuoso por obstrucción traen como consecuencia el funcionamiento de las incisiones que en algunos sectores presentan una rápida evolución. Las incisiones longitudinales se ven favorecidas por tres factores: la intensidad de uso de la pista (las rodaduras de los vehículos canalizan el agua con facilidad), la pendiente longitudinal de la calzada y la orientación del tramo de pista. Las incisiones más desarrolladas se localizan allí donde el desnivel es máximo y los drenajes inexistentes. Las incisiones transversales vienen a coincidir con los tramos de las pistas que se encuentran en sectores cóncavos de ladera ("tramos entrantes").

En algunas calzadas no se dan condiciones favorables para la aparición de incisiones o regueros, de modo que son el impacto de las gotas de lluvia y la escorrentía laminar los procesos más activos. Las pérdidas de suelo por estos procesos no son tan elevadas como las provocadas por el agua encauzada en regueros e incisiones, sin embargo sí puede ser importante su efecto acumulativo. En simulaciones de lluvia llevadas a cabo en calzadas de terreno natural compactado la escorrentía superficial comenzó a funcionar a los 6 minutos. Las parcelas arrojaron un coeficiente de escorrentía medio del 46%. En la mayor parte de las pruebas se constató un delgado frente de humectación, confirmando la resistencia a la infiltración del agua. El transporte de sedimentos en las pruebas de simulación alcanzó valores medios de 14.2 g m^{-2}. Las mayores pérdidas de sedimentos coinciden con altos porcentajes de escorrentía.

En las calzadas de las pistas forestales de terreno natural, el impacto de las gotas de lluvia levanta las partículas más finas que sellan los poros del suelo. El efecto de sellado, apelmazamiento e incrustado de las piedras se ve muy reforzado por el paso de vehículos. En estas condiciones se generan altos valores de escorrentía superficial, aunque bajas pérdidas de suelo.

A pesar de que en otras zonas se ha relacionado la infiltración del agua en la

calzada con deslizamientos del talud inferior (Dunne & Leopold, 1978), en los tramos de pistas de nuestra área de estudio esta evolución no es muy habitual, dada la escasa capacidad de infiltración de los suelos compactos de las calzadas. No obstante, se observa una importante variedad de procesos en los bordes exteriores de las calzadas como grietas y roturas y algunos deslizamientos en los taludes inferiores relacionados con drenajes defectuosos.

6.2.3. Subsistema del talud inferior (T2)

En el talud inferior se ha indicado que el proceso dominante es el arroyamiento difuso severo. Éste, de todos modos, se manifiesta con distinta intensidad e importancia. Así en el MODELO 1 tiene una escasa representación (8.4%) mientras que, por el contrario, en el MODELO 2 viene a afectar al 72.6% de la superficie del talud y en el MODELO 3 al 36%. La actuación del arroyamiento difuso severo está relacionada principalmente con dos controles: las dimensiones del talud y, sobre todo, el porcentaje de cubrimiento vegetal. Como se ha podido comprobar en el capítulo correspondiente, la recolonización vegetal está directamente relacionada con la edad de la pista, el tipo de suelos, la capacidad de recolonización a partir de la ladera y algunas variables climáticas. En el talud inferior del MODELO 1 el porcentaje de cubrimiento es máximo (68.35%). Mayores tasas de intercepción y evapotranspiración justifican un menor aporte de agua al suelo, pero además la vegetación se encarga de reducir la actividad del impacto de las gotas de lluvia y, en algunos casos, de retener la velocidad del agua que circula por el suelo. En el MODELO 2, por el contrario, la cubierta vegetal apenas alcanza el 18% correlacionándose con un alto porcentaje de erosión por arroyamiento difuso severo.

A pesar de que el arroyamiento difuso severo ocupa una importante superficie de los taludes inferiores su actividad es más bien limitada. Las parcelas de simulación de lluvia han permitido concluir que en T2 los valores de escorrentía y erosión son más bajos que en los taludes superiores (T1). La acumulación de material suelto y envuelto en una matriz fina proveniente de la construcción de la carretera facilita la infiltración y reduce la escorrentía. La cubierta vegetal también reduce el papel del impacto de las gotas de lluvia (splash). De hecho, los coeficientes de escorrentía son más moderados, con un porcentaje medio del 33.6% y máximo en torno al 40%. La concentración media de sedimentos en suspensión ha sido calculada en 0.9 g l^{-1}. El valor máximo de pérdida total de suelo es 15.1 g m^{-2}.

Por otro lado, el estudio del comportamiento del arroyamiento laminar en T2 a lo largo de diferentes estaciones del año permite deducir ciertos mecanismos de compensación a la erosión.

Los taludes de las pistas durante el invierno manifiestan preferentemente tasas de acumulación que están vinculadas a la actuación del hielo-deshielo. En concreto, se ha observado el decisivo papel de las agujas de hielo o pipkrakes en el levantamiento de partículas, primeramente, y deposición posterior. En primavera, el incremento de las precipitaciones facilita la activación de la erosión. El verano es la estación que dispone de las tasas de erosión más altas, ya que en el área de estudio durante el verano pueden registrarse tormentas de alta intensidad horaria. Por otra parte, el suelo se encuentra agrietado, seco y suelto, presentando mejores condiciones para ser movilizado. En el otoño vuelven a hacer su aparición las heladas y de nuevo se detecta una alternancia entre la erosión y la sedimentación.

Los movimientos en masa en los taludes inferiores son procesos menos importantes, aunque pueden observarse junto a los talvegs o donde se concentran grandes cantidades de agua, bien por corresponder a zonas bajas de laderas o vaguadas, o bien por deficiencias en el diseño o mantenimiento desagües o cunetas. Esto puede ser especialmente importante ante fenómenos meteorológicos de alta intensidad cuando se producen tras épocas de reiteradas y abundantes precipitaciones durante el invierno, o en periodos de alta fusión nival que provocan el incremento de la capa freática en los suelos.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La necesidad de conservar y explotar los recursos de la montaña ha animado a las distintas administraciones a trazar y construir una densa red de pistas forestales. El número y la longitud de las pistas en España se ha incrementado en paralelo a una activa política de repoblaciones forestales y lucha contra los incendios. Además, recientemente se han abierto nuevas pistas para el montaje y mantenimiento de parques eólicos o tendidos eléctricos, para la instalación de infraestructuras de telecomunicaciones o para la construcción de presas.

La Comunidad Autónoma de La Rioja, a pesar de su escasa extensión (5.034 Km^2), dispone de un alto porcentaje de áreas de montaña (casi el 50% de su superficie) en las que se ha trazado un importante número de pistas forestales. Concretamente, en 1979 el ya desparecido ICONA (Instituto para la Conservación de la Naturaleza) atribuía a La Rioja 710 kilómetros de pistas, cifra que en la actualidad, y según los datos disponibles, se ha quintuplicado, lo que supone una densidad de 14.8 m/Ha en nuestra zona de estudio. Esta cifra supera ampliamente la densidad media estimada como necesaria para la realización de trabajos de reforestación (entre 8 y 10 m/Ha) según criterios exclusivamente económicos (Elorrieta, 2001). En la actualidad siguen construyéndose algunas más en el marco de proyectos generales de reforestación financiados por fondos comunitarios.

Las labores de construcción de una pista forestal, habitualmente realizadas con limitados presupuestos y en medios tan inestables como los montanos, implican un conjunto de impactos medioambientales de diversa intensidad. Si estos impactos se ciñen exclusivamente a los aspectos geomorfológicos, las pistas forestales recién construidas pueden convertirse en importantes áreas-fuente de sedimentos, con diversificación de procesos e incremento de las tasas de erosión. Esta actividad erosiva puede incluso ser veinte veces más elevada que la correspondiente al periodo de uso (Hattinger, 1984). Megahan (1974) y Burroughs & King (1989) demostraron que las tasas de erosión superficial procedentes de las calzadas y taludes son muy elevadas en los dos primeros años después de la construcción para decrecer exponencialmente con el tiempo.

A pesar de este comportamiento decreciente de las tasas de erosión con el paso del tiempo, lo cierto es que las pistas forestales siguen siendo áreas productoras de

sedimentos a lo largo de toda su vida útil. Batalla *et al.* (1995) indican, por ejemplo, que en la cuenca del río Arbucies el 10% de la producción de sedimentos es responsabilidad de la red de pistas y carreteras. En pequeñas cuencas de los Cárpatos, Froehlich (1995) apunta que entre el 70 y el 80% de los sedimentos en suspensión provienen de las pistas forestales. Esta dinámica convierte a las pistas en sectores especialmente atractivos para la observación y comprensión en detalle de los procesos de erosión (Petersen, 2002). La mayor actividad de la erosión en pistas forestales puede justificarse por cuatro motivos:

1. La ruptura del perfil topográfico de la ladera. La excavación exigida para la instalación de una pista rompe la pendiente inicial, creándose pequeños taludes de varios metros con fuerte pendiente. Por ejemplo, en las pistas estudiadas del Sistema Ibérico riojano la pendiente media de las laderas ha sido calculada en 18.5º. Los ángulos de los taludes correspondientes a la pista alcanzaron los 43º para el corte-talud (T1) y 34º para el talud inferior (T2).
2. La interrupción de las escorrentías que circulan por la ladera. Tanto la escorrentía subsuperficial como la superficial modifican su discurrir por la ladera. En el primer caso, se crean áreas saturadas en los taludes favorecedoras de movimientos en masa. La escorrentía superficial acelera su dinámica como consecuencia del cambio de pendiente que supone el talud y la falta de cubierta vegetal.
3. La desaparición del suelo y de la cubierta vegetal en el sector de la ladera ocupado por la pista forestal. La falta de protección vegetal en los taludes facilita el impacto de las gotas de lluvia y la acción de las escorrentías. En las pistas forestales estudiadas la vegetación sólo cubre, como valor medio, el 22% de la superficie del corte-talud (T1) y un 59% de la correspondiente al talud inferior (T2). Estos porcentajes son consecuencia de lentos procesos de recolonización vegetal muy condicionados por los factores ambientales.
4. La compactación de la superficie de la calzada de la pista forestal. Las calzadas de las pistas forestales estudiadas no están asfaltadas. Los distintos trabajos de acondicionamiento y la continua circulación de vehículos apelmazan su superficie, de modo que con precipitaciones intensas, dada la escasa infiltración del sector, se incrementa la actividad de las escorrentías superficiales.

En las pistas forestales riojanas se ha detectado un amplia variedad de procesos de erosión que actúan con distinta intensidad en los diferentes sectores de las pistas. De manera sintética pueden distinguirse tres grupos de procesos: los vinculados a las escorrentías superficiales (arroyamiento difuso severo e incisiones), los movimientos en masa y, finalmente, un conjunto de pequeños procesos de limitado impacto (caída de tepes, pipkrakes, terracetas, etc.).

Escorrentías superficiales. Las escorrentías superficiales son responsables de procesos como el arroyamiento difuso severo y las incisiones. El primero es frecuente en los taludes desprovistos de vegetación en los que se detecta un alto porcentaje de piedras, que quedan resaltadas por el lavado de los materiales finos, y microcanales trenzados que reconducen parcialmente las escorrentías. También puede observarse en las calzadas de las pistas.

Espacialmente el arroyamiento difuso está más representado en los taludes inferiores (T2), donde ocupa el 27.5% de la superficie muestreada. En los cortes-taludes (T1) este porcentaje desciende al 12.2%. No obstante, la producción de escorrentía superficial y las tasas de erosión son más elevadas en estos últimos.

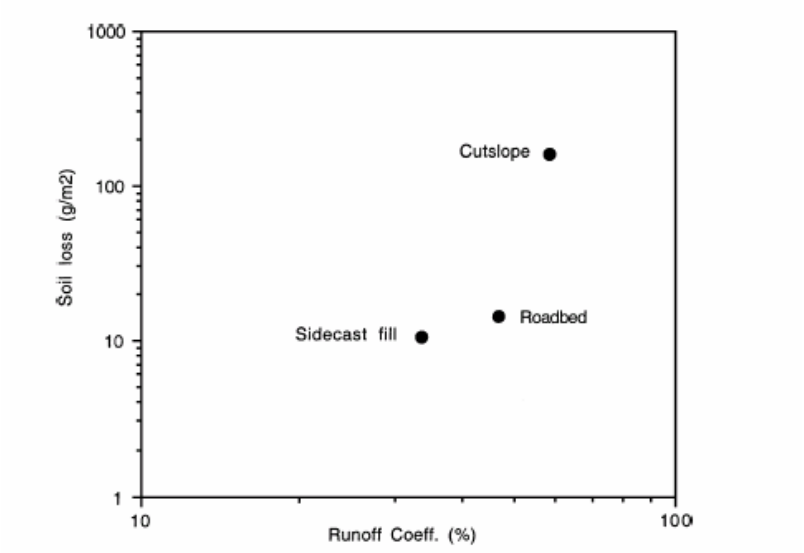


Fig. 7.1. Relación entre la escorrentía y las tasas de erosión para cada sector de las pistas forestales. Cada punto representa la media de las simulaciones.

La figura 7.1 compara los coeficientes de escorrentía medios y las tasas de pérdidas de suelo en cada uno de los sectores de las pistas forestales. Se puede comprobar como ambos procesos aportan valores más elevados en el corte-talud (T1), resultados que vienen a coincidir con los reseñados en la bibliografía. Así, Coker & Fahey (1993) señalan que los cortes-taludes generan aportes de sedimentos nueve veces superiores a los de las calzadas. La inclinación de estos taludes y la mayor disponibilidad de sedimentos justifican este comportamiento. Por lo que respecta a este último aspecto, Arnáez & Larrea (1995) han explicado que los procesos hielo-deshielo durante el invierno y primavera proporcionan material suelto al corte-talud. A semejantes conclusiones han llegado Regües y Gallart (1996) en áreas de badlands.

Los taludes inferiores (T2) muestran unos valores bajos tanto por lo que respecta a la escorrentía como a la erosión. La acumulación de material suelto proveniente de la construcción de la pista facilita la infiltración y reduce la escorrentía. Por lo que respecta a la erosión, el mayor porcentaje de cubierta vegetal de estos sectores reduce el efecto del impacto de las gotas de lluvia. No obstante, los experimentos de campo demuestran que la escorrentía y la erosión podrían incrementarse en los taludes inferiores con una destacada longitud, inclinación y un importante porcentaje de piedras en la superficie. Un alto porcentaje de piedras favorece pequeñas concentraciones de agua en sus bordes con una importante capacidad de transporte. También los experimentos de campo indican que la estación más crítica para la actividad de la escorrentía superficial es el verano, especialmente tras la descarga de precipitaciones de fuerte intensidad horaria. Por otro lado, en esta época el suelo permanece agrietado, seco y suelto presentando las mejores condiciones para ser movilizado.

La figura 7.2 relaciona los coeficientes de escorrentía y tasas de erosión obtenidos a partir de simulaciones de lluvia –método aplicado en este trabajo- en áreas con diferentes usos del suelo (Lasanta *et al.,* 2000; Cerdà, 1993, 1994; Cerdà & García-Fayos, 1994; Arnáez *et al.,* 1996; Regüés & Gallart, 1996). Los experimentos comparados, como es lógico, se han realizado con simuladores similares y parecidas intensidades de precipitación. El corte-talud (T1) de las pistas forestales tiene una respuesta semejante a las parcelas cultivadas con cereales y a los campos abandonados en pendiente (1, 2 y 3).

Estos usos del suelo tienen una tasa media de erosión de 200 a 300 g m^{-2} h^{-1} y unos coeficientes de escorrentía entre el 40 y 60%. Los taludes inferiores (6) presentan comportamientos muy parecidos a los observados en terrazas abandonadas (5). Las tasas de erosión en estos ambientes varían entre los 20 y 30 g m^{-2} h^{-1} y los coeficientes de escorrentía se sitúan entre el 30 y 50%.

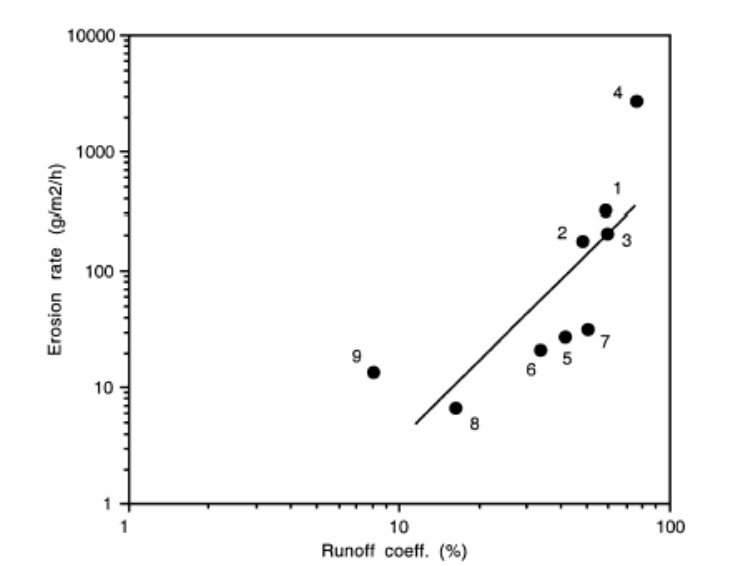


Fig. 7.2. Escorrentía y erosión a partir de pruebas de simulación de lluvia en áreas con diferente uso del suelo. (1) Corte-talud de pista forestal. (2) Parcela cultivada de cereales (Lasanta et al., 2000ª). (3) Campos en pendiente abandonados (Arnáez et al., 1996). (4) Badlands (Cerdà & García Fayos, 1994). (5) Terrazas abandonadas (Lasanta et al., 2000b). (6) Talud inferior de pista forestal. (7) Calzada de pista forestal. (8) Laderas con cubierta de matorral (Cerdà, 1994). (9) Parcela afectada por un incendio (Cerdà, 1993).

En las calzadas de las pistas forestales se detecta una alta producción de escorrentía superficial pero bajas tasas de pérdidas de suelo (Fig. 7.1). La compactación y sellado de estas superficies reduce la capacidad de infiltración e incrementa la circulación hídrica superficial. La compactación de las calzadas de las pistas podría también explicar la baja disponibilidad de sedimentos al impedir una actuación intensa del impacto de las gotas de lluvia.

Además del papel del impacto de las gotas de lluvia y del arroyamiento superficial, en las calzadas actúa la escorrentía concentrada a partir de incisiones de diferente tamaño.

Estas incisiones se desarrollan en microtopografías favorables (desniveles, cambios bruscos de pendiente, etc.), con especiales condiciones de la circulación hídrica en taludes saturados (afloramientos de manantiales), con ausencia de sistemas de drenaje, o con una intensa circulación de vehículos. Una buena parte de las incisiones evolucionan normalmente a partir de las rodaduras de los vehículos por lo que presentan una mayor anchura que profundidad y una nula o escasa jerarquización. Una vez marcada la rodadura por parte de los vehículos, el desarrollo de las incisiones puede ir acentuándose a medida que la calzada se use con más intensidad, el firme se encuentre saturado o no se realicen labores de reacondicionamiento de la calzada.

En los procesos de erosión de las pistas forestales vinculados a las escorrentías intervienen factores tanto topográficos como ambientales. En los taludes (T1 y T2) el estudio ha permitido comprobar que las variables decisivas en el incremento del papel de las escorrentías superficiales son:

1) La litología y suelos. Las pistas que trascurren por litologías y suelos impermeables son muy susceptibles a la erosión hídrica. En nuestro caso los suelos más arcillosos del sector oriental del Sistema Ibérico riojano son los que presentan una mayor densidad de procesos y formas propios de la escorrentía superficial.

2) Las características de los taludes, especialmente su inclinación y longitud. A esta misma conclusión llegan Megahan *et al.* (2001). Después de trabajar con diferentes variables (pendiente, longitud, exposición, erosividad de la lluvia y cubierta vegetal) señalan que es la pendiente del talud el factor más determinante en la erosión y concluyen que las correcciones o actuaciones tendentes a la disminución de la erosión deben centrarse en este factor.

3) La cubierta vegetal. La recolonización vegetal en los taludes es lenta y está muy condicionada por la edad de la pista, el tipo de suelos, la capacidad de recolonización a partir de la ladera y algunas variables topográficas y climáticas.

   En las pistas estudiadas del Sistema Ibérico riojano se han observado diferencias significativas con relación al cubrimiento vegetal de los taludes. En concreto, el corte-talud (T1) presenta una revegetación más lenta y menos densa (21.8%). La excesiva pendiente y la actividad de los movimientos en masa (deslizamientos, coladas de barro, etc.), muy activos en primavera, dificultan el enraizamiento y el

crecimiento de las plantas. El talud inferior (T2) -configurado por derrubios sueltos- dispone de una mayor cubierta vegetal (59%). Aquí la menor pendiente y las propias características del material, suelto y rico en nutrientes, sí favorecen el desarrollo vegetal. Es en estos taludes donde la vegetación se manifiesta como un eficaz control del arroyamiento difuso severo y de las incisiones. Mayores tasas de intercepción y evapotranspiración justifican un menor aporte de agua al suelo, pero además la vegetación se encarga de reducir la actividad del impacto de las gotas de lluvia y, en algunos casos, de retener la velocidad del agua que circula por el suelo.

El proceso de recolonización de la vegetación en los taludes sigue unas pautas muy definidas. En el corte-talud (T1) la vegetación penetra en forma de banda desde la ladera situada aguas arriba de la pista, lo que se deduce por el mayor cubrimiento vegetal del tercio superior del talud. De la misma forma aparece otra orla al pie del talud vinculada a las buenas condiciones de humedad, acumulación de material suelto y recepción de semillas. En el talud inferior (T2) el proceso de la recolonización, partiendo de la vegetación existente en la ladera, avanza desde el pie del talud. No obstante, parte de esta vegetación -sobre todo la cubierta arbórea- puede ser previa al vertido de los derrubios, habiendo permanecido parcialmente cubierta.

4) El funcionamiento del agua en la ladera. Los taludes de las pistas forestales son superficies con mucho suelo desnudo que se ven afectados por el impacto de las gotas de lluvia y por la escorrentía. Pero también recogen el agua procedente de la ladera que en estos sectores acelera su velocidad al incrementarse la pendiente. En los cortes-taludes (T1) el agua procede directamente de la ladera o surge, como flujo de retorno, si la escorrentía dominante es la subsuperficial. En los taludes inferiores el agua desciende de la calzada de la pista. Ésta se incorpora de forma difusa o concentrada si no se han habilitado sistemas eficaces de evacuación en la calzada (drenajes y cunetas). Diversos estudios (Bloom, 1998; Madej, 2001) –incluido el nuestro- han remarcado que las tasas de erosión en pistas forestales se incrementan especialmente en los pies de ladera. Esto es esperable, pues no hay que olvidar que en estas zonas confluyen las escorrentías superficiales y subsuperficiales y es donde suele darse un incremento importante de la pendiente

por el encajamiento de la red hídrica.

En la calzada de las pistas inciden otros factores que hay que considerar en el estudio de la producción de sedimentos por escorrentías:

1) La eficacia de los drenajes y cunetas. En el estudio se ha comprobado la eficacia de estas pequeñas obras en la protección de la calzada. No obstante, su deterioro, mal funcionamiento o deficiente diseño pueden plantear diversos problemas tanto en la calzada como en el talud inferior (T2). Es necesario llevar a cabo tareas de mantenimiento periódico en los sistemas de drenaje (Tolosana, 1993). Se muestra más efectivo para controlar la generación de escorrentía y producción de sedimentos la proliferación de pequeñas infraestructuras que la instalación de un reducido número de drenajes de grandes dimensiones.

2) El tipo de firme. Los firmes de grava suelta muestran una menor degradación de la pista por incisiones. Si el terreno es natural y no está estabilizado, las irregularidades (pequeños cambios de pendiente, baches, etc.), favorecerán el inicio de pequeñas rigolas o arroyamiento laminar. Cuando se estabiliza la calzada con máquinas pesadas, el firme se impermeabiliza y se incrementan las escorrentías, aunque se registran bajas tasas de sedimentos en suspensión, al estar los suelos muy compactados y sellados. No obstante, con el paso del tiempo si no se repone el material desgastado o movilizado, estas calzadas presentarán incisiones o desnivelaciones.

   Si la calzada ha sido cubierta con zahorra fina, inicialmente la nivelación es casi perfecta pero aparecerán muy pronto irregularidades, grietas e incisiones si la calzada no se mantiene o recubre (con asfalto o cemento). Si la zahorra es gruesa, se producirá una selección de las gravas por tamaños también con el paso de los vehículos. Las rodaduras de los vehículos lentamente irán marcándose, de modo que, si no se realiza reposición de zahorra, las incisiones surgirán en las zonas con cambios de pendiente.

3) La intensidad de uso de la pista. La circulación de vehículos se ha mostrado como un factor decisivo en el deterioro de la calzada de las pistas, ya que la inmensa mayoría de las incisiones se inician a partir de las huellas de rodadura. Zhang & Cundy (1987) y Reid & Dunne (1984) obtuvieron elevadas cifras de erosión en

pistas con una alta intensidad de uso. Fransen *et al.* (2001) han afirmado que la reiterada circulación de vehículos pesados por una misma pista (veinte recorridos de un camión) puede producir tantos sedimentos como el generado por un año de erosión natural en pistas poco transitadas.

4) Los trabajos de mantenimiento. Es necesario que en todas las pistas se lleven a cabo trabajos de mantenimiento periódicos. Reacondicionar y limpiar las cunetas y los drenajes, así como nivelar la calzada reponiendo las pérdidas de suelo o firme ocasionadas por la erosión, son labores necesarias para alargar la vida útil de las pistas. Por desgracia en la mayoría no se han detectado labores de mantenimiento, presentando muchas calzadas síntomas de un claro abandono. Las pistas en estas condiciones presentan una rápida evolución geomorfológica. En los últimos años se ha detectado un esfuerzo en la mejora de los drenajes y el control del tránsito en la red de pistas.

5) Los desniveles de las calzadas. Los tramos con fuerte gradiente son los que se muestran especialmente proclives a la actuación del arroyamiento difuso y concentrado. Las pistas a menudo superan los valores de pendiente recomendados. Por otro lado, los tramos llanos pueden presentar problemas de saturación y encharcamiento.

6) El cubrimiento vegetal. Es razonable esperar que las calzadas de las pistas carezcan de vegetación. Así ocurre cuando son transitadas con asiduidad o cuando se les aplican labores de mantenimiento y limpieza. No obstante, cuando esto no ocurre la vegetación coloniza las calzadas desde los taludes con diferente rapidez e intensidad. Los laterales de la calzada (y especialmente los que entran en contacto con el talud inferior) son los primeros en ser ocupados por la vegetación herbácea o por el matorral. Se ha comprobado que la primera frena la erosión hídrica superficial. En las pistas más antiguas, y con apenas tránsito, la vegetación puede llegar cubrir el 100% de la calzada como se puede ver en muchas trochas de Sierra la Hez o de la Demanda.

Del conjunto de pistas estudiadas, las localizadas en el sector oriental de la montaña riojana son las que cuentan con mayores problemas de erosión hídrica superficial y sus taludes tienen mayores dificultades para ser recolonizados por la vegetación. Esto no es

de extrañar dadas las condiciones geoecológicas del sector y la intensidad de uso del suelo de este territorio por parte del hombre.

Movimientos en masa. Desde un punto de vista del impacto en el paisaje, de la transitabilidad y de la producción de sedimentos, los movimientos en masa en pistas forestales son los procesos de erosión más preocupantes. Fransen *et al.* (2001) afirman que en pistas de Nueva Zelanda los volúmenes de sedimentos procedentes de movimientos en masa activados en el corte-talud (T1) representan más del triple que los ocasionados por el arroyamiento superficial. Las rupturas masivas de taludes por movimientos en masa supusieron en el área granítica de Nelson el 80% de los sedimentos, un equivalente a 80 años de erosión superficial continuada (Coker & Fahey, 1993). Grant & Wolf (1991) mostraron el papel de los movimientos en masa en la producción de sedimentos en cuencas con fuertes pendientes. Seis años después de la construcción de una carretera, las tormentas habían favorecido movimientos en masa que contribuían en un 90% a la producción total de sedimentos, más de 26 veces los producidos en un área arbolada de control.

En nuestro trabajo se ha calculado con una sencilla técnica el volumen desplazado en los movimientos en masa de los taludes de tres pistas forestales. También se ha trabajado con técnicas estadísticas para conocer las probabilidades de activación de este tipo de procesos en el área de estudio, de modo que hay un 25-30% de probabilidades de que se inicien deslizamientos con un volumen igual o superior a la media. El diseño de una función para el cálculo de volúmenes a partir de la longitud, profundidad media y anchura ha sido importante para el apartado dedicado a los riesgos.

El volumen medio obtenido ha sido de 10 m^3, comprobándose mayor movilización de material en el talud inferior (T2) (15 m^3) que en el corte-talud (T1) (9 m^3). Son, por lo tanto, procesos de pequeñas dimensiones. No obstante, la variabilidad es importante, de modo que pueden encontrase movimientos en masa de menos de 1 m^3 y otros por encima de 100 m^3. En conjunto, las tres pistas estudiadas suman 1.406 m^3 de material movilizado, asumiendo los 29 deslizamientos de mayor envergaduras (21.4%) el 80.4% del volumen removido. Destacan por su número y tamaño los movimientos en masa de la pista de Hoyos de Iregua.

Como se puede comprobar, en las pistas estudiadas los movimientos en masa no alcanzan la espectacularidad de los procesos de las cordilleras alpinas pero sí pueden cortar el paso temporalmente a los vehículos, destruir la calzada de la pista y obligar a labores de reconstrucción o reacondicionamiento. La vulnerabilidad de algunos tramos de pista se manifiesta especialmente cuando ésta cruza cabeceras activas de barranco (arroyo Menárez en la Demanda), laderas húmedas de fuerte pendiente (arroyo Regatillo en Anguiano) o depósitos morrénicos (pista de Hoyos de Iregua). En estos casos, con proliferación de movimientos en masa en escasos metros de talud, pueden identificarse laderas más activas con segmentos o zonas "críticas" en las que la cubierta vegetal es incapaz de retener el suelo y la altura del talud se convierte en un factor crítico a la hora de sumar más deslizamientos.

El 80% de los procesos y el 69% del volumen se localiza en el corte-talud (T1). Los taludes inferiores (T2) presentan deslizamientos de importantes dimensiones cuando confluyen determinados factores. No obstante, en general, son menos frecuentes, más alargados y a menudo muy superficiales. Esto no es de extrañar, pues, estos taludes no suelen saturarse como consecuencia del desvío del agua por las obras de drenaje de la calzada o de la evapotranspiración generada por la cubierta vegetal.

En los taludes inferiores los movimientos en masa suelen activarse cuando la pista discurre por sectores muy húmedos de la ladera (proximidades de barrancos) o cuando los drenajes no existen o han sido deficientemente diseñados. Así ocurre en sectores de la pista de Hoyos de Iregua, en la de Anguiano a los Gamellones o en la del barranco de San Sebastián, en el Villar de Poyales. En algunas pistas se han detectado numerosas grietas en la parte exterior de la calzada. Estas grietas pueden evolucionar y provocar repentinos deslizamientos que inutilizan pistas y carreteras y obligan a su reconstrucción.

En el área de estudio se distinguen tres grandes tipos de movimientos en masa. Un tipo representa procesos que se activan en los taludes que recorren pies de ladera, orientadas al sureste, en una franja altitudinal media (1000-1300 metros). Es decir, allí donde van a parar, tras recorrer las laderas, las escorrentías, especialmente las subsuperficiales, que saturan los taludes superiores de las pistas forestales.

El segundo tipo incluye movimientos en masa que aparecen a altitudes elevadas (por encima de los 1600 metros), en sectores medios y altos de laderas, con formas

cóncavas, y orientaciones preferentemente septentrionales (noroccidental y nororiental). Los datos inducen a pensar que son sectores donde se saturan con facilidad los suelos, especialmente en momentos de fusión de nieve. La ruptura del perfil de la ladera por medio de los taludes de las pistas provoca movimientos en masa de dimensiones importantes.

El tercer tipo corresponde a deslizamientos de pequeño tamaño, desarrollados a escasa altitud (por debajo de los 1000 metros), en tramos de pista forestal que disecciona pendientes muy suaves y en taludes de fuerte pendiente. La mayor parte de estos deslizamientos corresponden a movimientos en masa desarrollados en taludes que seccionan laderas ocupadas por bancales.

El estudio de los movimientos en masa nos ha permitido conocer los factores ambientales y topográficos más decisivos en su desencadenamiento.

1) Los materiales sueltos y poco cohesionados generan movimientos en masa de mayor tamaño. Por ejemplo, las morrenas seccionadas por la pista forestal de Hoyos de Iregua son altamente inestables. Por el contrario, las pizarras y los conglomerados son las litologías que disponen de movimientos en masa de menores dimensiones.

2) Los aportes de agua provenientes o bien de las precipitaciones intensas o bien de la fusión del hielo son decisivos en el funcionamiento de estos procesos. No es inhabitual encontrar movimientos en masa de grandes dimensiones por encima de los 1600 metros y en orientaciones umbría, más húmedas y abiertas a los frentes dominantes. En Hoyos de Iregua las precipitaciones primaverales de marzo de 1996 provocaron, tras un invierno de grandes y continuas precipitaciones, un buen número de movimientos en masa. Wemple *et al.* (2001) detectaron, tras fuertes tormentas, una gran diversidad de movimientos en masa que relacionaron con la fusión y la precipitación. Fransen *et al.,* 2001 encontraron producciones de sedimentos entre 40 y 8000 t km^{-1} en pistas tras fuertes tormentas.

3) Los movimientos en masa son de mayor tamaño en pistas forestales que discurren por laderas pronunciadas (superiores a los 20º), con formas cóncavas y convexas. En las laderas bajas, próximas a los arroyos y ríos, la saturación se alcanza fácilmente y los amplios sectores de los taludes se desplazan al alcanzar los límites

de plasticidad y liquidez.

4) La vegetación no se ha comportado como un control eficaz en el desarrollo de movimientos por encima de los 10 m^3. Las raíces de la vegetación arbórea, en suelos permeables, favorecen los movimientos de suelo en el corte-talud como consecuencia del incremento de la infiltración y la presión porosa de las escorrentías subsuperficiales (De Ploey & Cruz, 1979). Por debajo de los 34º los árboles incrementan la estabilidad de la ladera, pero cuando estas pendientes son mayores (como ocurre en los cortes-taludes) el efecto de su peso no es compensado por el papel de sujeción de las raíces (Selby, 1993).

5) Existe una relación entre el volumen desprendido y la mayor dimensión (altura y longitud) del talud. La pendiente del talud también es importante.

Para la evaluación del riesgo por movimientos en masa en pistas forestales se han utilizado sistemas de información geográfica (SIG) y técnicas estadísticas multivariantes, especialmente el análisis discriminante. Este método ha sido aplicado, en primer lugar, a unidades de ladera (UL) en una banda de 50 m ladera arriba y ladera abajo de la pista de Hoyos de Iregua. Posteriormente, se ha intentado alcanzar una mayor nivel de precisión a partir del análisis de cada uno de los “pixels” situados en la banda situada 25 m ladera arriba y ladera abajo de la calzada.

Los resultados obtenidos en las UL han sido aceptables en el tramo de análisis, pero pobres en el tramo de validación. En el primero se han logrado clasificaciones correctas superiores al 80% de los casos. La validación del método en un nuevo tramo de pista ha aportado peores resultados. El porcentaje de clasificación correcta del análisis discriminante no llega al 50%. Los resultados parecen indicar que algunas unidades de ladera no han activado movimientos en masa en los taludes de las pistas, pero reúnen adecuadas condiciones ambientales para ello. Serían, pues, sectores de taludes potencialmente inestables.

El estudio por “pixels” ha mejorado los resultados en el tramo de validación. Se ha obtenido un porcentaje de éxito del 66.6% para los casos inestables. Predicciones de deslizamientos entre el 66 y 75% consiguieron Collison & Anderson (1996) con métodos

más sofisticados. Los modelos multivariantes suelen alcanzar una explicación de la variabilidad superior al 80 % pero se hacen necesarios test que validen los resultados y evalúen los distintos tipos de error (Carrara et. al. 1995). Las predicciones en el tramo de validación en el análisis de los movimientos en masa según tamaño fueron más pobres, como era de esperar, al obtener una clasificación correcta del 58.3% en todos los casos. Mejoraba ligeramente en los movimientos de mayor tamaño (60% clasificados correctamente).

A partir del análisis estadístico mencionado se ha confeccionado una cartografía de riesgo. Las áreas con mayor probabilidad de actuación de los movimientos en masa se encuentran en los depósitos morrénicos. Los tramos situados a mayor altitud incrementan el riesgo al intervenir el agua de fusión nival. El seccionamiento de los canchales por la pista también favorece la inestabilidad. Finalmente, son clasificables como zonas de riesgo las laderas bajas próximas a los ríos en donde los flujos subsuperficiales son importantes y las pendientes fuertes.

Obviamente la no utilización en el análisis de algunas variables importantes, por la imposibilidad de obtenerlas a partir de información cartográfica o fotográfica, puede justificar la imprecisión del método. Se exige, pues, perfeccionar este tipo de metodología con un preciso conocimiento de los factores desencadenantes y una mejora en la resolución del material cartográfico. La mayor potencia de cálculo de los ordenadores y la integración de modelos hídricos redundará también en la obtención de resultados más rigurosos y fiables.

El conjunto de procesos de erosión que actúan en los taludes de pistas forestales –y que han sido descritos en el trabajo- condicionan en gran medida su evolución geomorfológica. De forma muy esquemática, si el corte-talud intercepta un estrato rocoso, el modelo de evolución podría ser muy semejante al reseñado en la literatura para las laderas de cornisa-talud *(slope replacement)*. Es decir, los procesos de meteorización, principalmente hielo-deshielo, fracturan el escarpe que sufre un proceso de retroceso. Las rocas caídas se acumulan al pie hasta configurar un talud regularizado, en el que predomina los materiales más o menos groseros.

Cuando el corte-talud de la pista se ha abierto en materiales no rocosos (suelos

potentes, manto de derrubios, materiales arcillosos), permanece un pequeño escarpe en el sector superior como consecuencia de la protección y sujeción que supone la presencia de raíces de los árboles y arbustos de la ladera. Al pie de este escarpe normalmente se produce un socavamiento, en algunos casos ayudado por la circulación de las escorrentías subsuperficiales (Arnáez Vadillo, 1984), que deja la pequeña cornisa en posición de extraplomo. El propio peso del escarpe unido al de la vegetación finalmente favorecen su caída y retroceso, acumulándose el material en un talud de 30 a 35º.

En estados avanzados de evolución el escarpe reduce sus dimensiones y los taludes se modelan a partir de distintos procesos de erosión. Si lo que predomina son pequeños movimientos en masa (reptación, solifluxión y coladas de barro) el talud puede adquirir una configuración convexa, con incremento de la pendiente. Si actúan los deslizamientos o la erosión laminar, el talud adquiere una perfil cóncavo también de elevada pendiente.

El talud inferior (T2) presenta unos perfiles mucho más suaves. Al estar configurado a partir de un derrubio suelto proveniente de la excavación de la ladera, los perfiles más comunes son los rectilíneos y cóncavos. Concretamente, el 38% son taludes rectilíneos con una pendiente de 34.2º. En menor proporción aparecen perfiles cóncavos (19%), con una pendiente de 34º y convexos (10.3%), con una inclinación de 36.3º.

El funcionamiento del sistema pista está lejos de ser suficientemente conocido. Los modelos que hasta ahora se han diseñado son parciales centrándose en la erosión superficial de la calzada y su predicción de sedimentos (Anderson y McDonald, 1998). Menos frecuentes son los estudios en los cortes-taludes y taludes inferiores. La mayoría de las veces se centran en sectores concretos de pista, segmentos muy localizados que forman parte de microcuencas (McFero, 1998), en tipos seleccionados de procesos, o en eventos de gran intensidad. Es necesario profundizar en el conocimiento de las pistas como sistema para idear modelos globales e integradores que permitan proporcionar herramientas útiles en la gestión de las redes de pistas y carreteras de montaña.

****

A partir de lo reseñado a lo largo de este trabajo, se puede afirmar que la estabilidad general de la montaña riojana y unas condiciones climáticas no extremadamente severas hacen que globalmente el estado geomorfológico de nuestras pistas no presente un carácter grave o catastrófico como ha podido ser observado en otras regiones. Sin embargo, sí pueden convertirse en áreas de aportación de sedimentos a los cauces a partir de procesos de arroyamiento difuso o concentrado y movimientos en masa. También pueden presentar por falta de mantenimiento problemas para ser transitadas principalmente en las estaciones invernal y primaveral, periodos en los que las condiciones ambientales intensifican y activan los procesos.

Actuaciones encaminadas a prevenir los efectos no deseados de la erosión en pistas forestales han sido puestas en práctica y evaluadas en diferentes áreas de montaña. Varios autores han aportado información para construir pistas forestales con menor capacidad de impacto en el medio ambiente: Gardner (1978), Packer (1967), Nagygyor (1984), Reinhart *et al.,* 1963, Swift (1985), Hewlett & Douglass (1968), Murphy (1985). Los criterios de diseño de pistas hacen especial hincapié en el control del agua y en las estructuras de drenaje que se consideran los condicionantes principales de la erosión y sedimentación (McFero *et al.,* 1998; Eck & Morgan, 1987). Siguiendo a Tolosana (1993), las medidas de prevención que se deben tomar en la construcción de las pistas forestales son las siguientes: evitar los desniveles fuertes en pistas sin firme y en materiales deleznables, facilitar la evacuación lateral con un peraltado ligero (3-5%), preferir los trazados en solana, disponer de drenajes mixtos (badenes, alcantarillas, zanjas en pistas temporales), emplear camiones con mayor número de ejes, reducir la presión de los neumáticos[1], realizar labores periódicas de mantenimiento. En zonas muy erosionables o con pendientes longitudinales muy fuertes puede ser necesaria la construcción de cunetas de obra en vez de excavarlas en terreno natural.

No solamente las actuaciones directas sobre las pistas forestales pueden reducir la erosión. Su adecuada utilización y la mejoras en la gestión forestal (no debe olvidarse que un altísimo porcentaje de pistas se construyen para el mantenimiento y explotación

[1] Esta medida puede reducir un 50% de la erosión según Bellito & Burroughs (1990).

de bosques) puede incrementar la duración en buenas condiciones de las pistas. Rice (1992) indica que, como resultado de mejoras en las prácticas forestales, puede reducirse un 80% la erosión por movimientos en masa en las carreteras forestales. Megahan *et al.* (1992) señalan que podría reducirse entre un 45 y un 90% la producción de sedimentos con sistemas de explotación forestal más adaptados al medio. Estos sistemas de explotación más eficientes incorporan la reducción de apilamientos de madera sobre las cunetas, la eliminación de arrastre de troncos, la sustitución de tractores de cadenas por los de ruedas con presiones moderadas, etc.

A partir de los resultados obtenidos en las pistas forestales estudiadas de La Rioja se está en condiciones de señalar algunas recomendaciones:

1) Los tramos de pista cuyos cortes-taludes (T1) alcanzan una fuerte pendiente –superior a 45º- son especialmente vulnerables desde un punto de vista de la erosión, con importante actividad de movimientos en masa. Estos deslizamientos interrumpen las cunetas y provocan un incremento del arroyamiento superficial en la calzada y en el talud inferior. En estos cortes-taludes muy pendientes deben, pues, extremarse las medidas de protección con métodos eficaces (por ejemplo, muros de contención de suficiente calidad). En cuanto a los taludes inferiores (T2), es aconsejable su construcción con longitudes reducidas y favorecer la recolonización vegetal. En el área de estudio son muy delicados los tramos de pista que recorren los pies de laderas, aquellos que ponen en contacto los fondos de valle con las laderas medias o las divisorias bajas. Del mismo modo debe valorarse con especial precaución el diseño de taludes en materiales arcillosos o morrénicos.

2) Si la construcción de la pista forestal conlleva, como es habitual, la interrupción de las escorrentías procedentes de la ladera, es imprescindible la instalación de sistemas de drenaje que reconduzcan y evacúen el agua, impidiendo que ésta alcance la calzada y el talud inferior. Estos sistemas de drenaje deben ser limpiados y mantenidos permanentemente ya que su bloqueo puede desviar el agua hacia la calzada acelerándose el desarrollo de incisiones. Los drenajes y pasos transversales deben construirse con trampas de sedimentos y en zonas lejanas a los arroyos para impedir el deterioro de la calidad de las aguas.

Especialmente delicados son los tramos de pista cuyas calzadas han sido diseñadas sin drenaje, con fuerte pendiente longitudinal, en sectores de umbría y laderas cóncavas. Estos tramos requieren especial vigilancia.

3) Los firmes de grava se muestran más resistentes al arroyamiento y a la degradación general de la calzada de las pistas, aunque es necesario su mantenimiento. La experiencia e investigaciones han establecido que una temprana aplicación de gravas y una siembra de herbáceas reduce en gran medida la salida de sedimentos de la calzada (Swift, 1984). El tipo de vehículo y el volumen del tráfico determinarán la anchura, pendiente, y tipo de firme para reducir la erosión y proporcionar una circulación segura (Swift & Burns, 1999).

4) En el estudio se ha comprobado la eficacia protectora de la vegetación. En aquellos sectores del talud inferior donde se ha dado un proceso de recolonización vegetal la actividad del arroyamiento difuso severo ha sido escasa. Es necesario, pues, considerar la necesidad de repoblar con especies adecuadas los taludes desnudos de fuerte impacto visual e importante actividad de la erosión laminar. La recolonización vegetal muestra un mayor éxito de las herbáceas y matorral en el talud superior (T1) y del arbolado y matorral en el inferior (T2).

El papel de la revegetación de los taludes de carreteras y pistas forestales como control de la erosión ha sido analizado desde los años cincuenta. Megahan et al. (2001) estudiaron el efecto de distintos tipos de tratamiento. Siguiendo a Collison & Anderson (1996), es necesario construir taludes de menos de 18 metros de altura, ya que la vegetación se muestra poco eficaz en aquellos que superan este tamaño. Las técnicas de revegetación tendrán que seleccionarse según los objetivos perseguidos y las aptitudes naturales de los taludes (Preston & Crozier 1999; Collison & Anderson 1996).

5) El impacto paisajístico de las pistas forestales debería ser minimizado con la siembra de herbáceas en el corte-talud (T1) y favoreciendo la recolonización con matorral autóctono en el talud inferior (T2). La restauración de los paisajes, especialmente en la Sierra de la Demanda, debería ser un objetivo a contemplar en el contexto de la gestión integral de nuestras áreas de montaña. La utilización

de los SIG para la valoración del impacto visual facilitaría la toma de decisiones relativas a la restauración de los paisajes naturales.

6) Por encima de los 1700-1800 metros deben extremarse en las pistas las medidas de prevención ya que en estas zonas se activan los procesos de erosión más graves ligados tanto a las escorrentías como a las acciones hielo-deshielo. La actividad de estas zonas es intensa, siendo especialmente delicadas las cabeceras activas de barranco, las vertientes con canchales o las laderas rocosas muy fracturadas y con fuertes pendientes. Por otro lado, el impacto paisajístico es aquí mucho mayor dado el escaso porte de la vegetación. El asfaltado de estas pistas no siempre es útil y carece de sentido si no se plantea con unos objetivos racionales y duraderos que consideren la necesidad de su mantenimiento anual.

7) Sería necesario valorar el cierre temporal de algunas pistas muy inestables en periodos de fuerte actividad erosiva (invierno y primavera, principalmente) para que los procesos de erosión en la calzada no se incrementen con la circulación de vehículos. Especialmente eficaz sería esta medida para las pistas con suelos y firmes en terreno natural limoso arcillosos donde las huellas de rodadura producen profundos surcos. Esta decisión se ha tomado en varias Comunidades Autónomas si bien se justifica por otros motivos (conservación de espacios de alto valor ecológico). Hay que tener en cuenta que al impacto ambiental provocado por la construcción de pistas sobre el relieve, suelo, vegetación, fauna, paisaje etc. se añade un gran número de efectos posteriores (caza furtiva, incendios, exceso de frecuentación, etc.). La transitabilidad y accesibilidad de estas vías debe ser abordada mediante su inventariado y catalogación.

8) Es necesario estudiar la posibilidad de desmantelar pistas “ciegas” o “huérfanas” (sin salida). El desmantelamiento de las pistas cerradas o abandonadas debe incluir la descompactación de las calzadas con el objeto de restaurar la productividad de los suelos forestales lo antes posible (Gucinsky et al., 2001) y la aplicación de acciones complementarias para reducir la erosión (Madej, 2001). En el Parque Nacional de las Sequoyas se han desarrollado y aplicado técnicas de restauración y desmantelamiento a una escala sin precedentes (Ziemer, 1997).

En áreas de montaña donde las pistas principales presentan tramos inestables y

peligrosos podría plantearse la posibilidad de una relocalización de su trazado. Es preferible diseñar un nuevo trazado que estar permanentemente reparando un segmento inapropiado e inestable.

9) Se considera que los estudios sobre la dinámica geomorfológica de las laderas deberían ser previos y necesarios no sólo para el diseño y construcción de pistas forestales, sino también para la implementación de las medidas necesarias para la reconstrucción o desmantelamiento de las ya existentes. Son necesarios estudios de tipo integral y a diferente escala que valoren los efectos físicos, geomorfológicos, ecológicos, paisajísticos y socioeconómicos de las pistas. Este ámbito de trabajo eminentemente aplicado ofrece amplias posibilidades para el geomorfólogo tal y como se ha puesto de manifiesto en la metodología de trabajo que se ha llevado a cabo en el Himalaya o en los Andes. Aquí la cartografía geomorfológica ha aportado una información de especial importancia para el trazado de pistas (Fookes *et al.,* 1985).

10) En las pistas forestales siempre es más adecuado y económico emprender medidas de prevención y conservación que esperar a aplicar técnicas de freno a la erosión cuando ésta ya ha comenzado a actuar. Merece la pena progresar en técnicas y métodos de evaluación de riesgos e impactos geomorfológicos con el fin de conseguir reducir los efectos negativos de los trazados de la red existente, estabilizar las zonas críticas y elegir las mejores alternativas en el diseño de las redes de pistas de montaña. Será clave en las investigaciones futuras el desarrollo de modelos que permitan a los gestores visionar las consecuencias hidrológicas de diseños de redes de carreteras o pistas. Estos modelos deberían extenderse a los procesos de erosión y a la evaluación de impactos en el paisaje Así mismo sería conveniente analizar las entradas, salidas y almacenamiento de sedimentos. Con esta información se podrían planificar labores periódicas de mantenimiento, reposición de firmes, limpieza de cunetas, etc. en distintas condiciones ambientales.

Las pistas forestales conllevan beneficios y problemas, ventajas y riesgos, en relación a múltiples aspectos ambientales, técnicos y sociales. La construcción y gestión de

carreteras y pistas de montaña deben ser asumidas por las administraciones con todas las precauciones posibles en la búsqueda del máximo equilibrio. Los efectos tanto positivos como negativos de las pistas forestales han de ser valorados en su conjunto intentando compaginar la mejor conservación de los valores naturales de la montaña y el desarrollo económico y social de sus habitantes. Esto, como se ha visto a lo largo del trabajo, sólo será posible a) si previamente a la construcción de una pista forestal, se realizan los estudios y análisis pertinentes sobre las características de las laderas y sectores por donde será trazada; b) si en el momento de la construcción, se toman las medidas necesarias para reducir el impacto ambiental de las labores que intervienen en su construcción; c) si, una vez construida, se adoptan soluciones para minimizar los efectos de los distintos procesos erosivos; y d) si a lo largo de su vida útil, se incluyen acciones de vigilancia y mantenimiento para permitir el acceso a la misma, evitar impactos negativos sobre la flora y fauna, y reducir la producción de sedimentos. En este marco la pista forestal podría cumplir los objetivos que se le han encomendado: la comunicación de los espacios de montaña sin deteriorar de forma importante el medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

VIII. BIBLIOGRAFÍA

Anderson, M. y LLoyd, D.M. (1991). Using a combined slope hydrology-stability to develop cut slope design charts. *Proceedings of the Inst of Civil Engineers,* 91, pp. 705-718.

Anderson, M.G., Collison, A.J.C., Harshorne, J., LLoyd, D.M. y Park, A. (1996). Developments in slope hydrology-stability modelling for tropical slopes. En: *Advances in Hillslope Processes*, vol. 2. (Anderson, M.G., Brooks, S.M., Eds.). Wiley, Chichester, pp. 799-821.

Anderson, D.M. y Macdonald, L.H. (1998). Modelling road surface sediment production using vector geographic information system. *Earth, Surface Processes and Landforms*, 23 (2): 95-107.

Arizaleta, J.A., Fernández, R. y Lopo, L. (1990). Los matorrales de La Rioja. *Zubía*, 8:83-127

Armesto, J. y Gil, M.L. (2001). Método automático de extracción de vías de comunicación a partir de la imagen IRS-P. *Teledetección, Medio Ambiente y Cambio Global*. pp.217-220.

Arnáez Vadillo, J. (1983). Factores condicionantes de la formación de pipkrakes en una montaña oceánica (Sierra de la Demanda, Sistema Ibérico). *VIII Coloquio de Geógrafos Españoles.* AGE-Universidad de Barcelona, pp. 77-83.

Arnáez Vadillo, J. (1984). Microformas de erosión y acumulación en pistas forestales: el ejemplo del alto valle del Cárdenas. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 10 (1-2):7-16.

Arnáez Vadillo, J. (1987a). Formas y procesos de erosión en la evolución de vertientes en la Sierra de la Demanda (Sistema Ibérico). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 13 (1-2): 1-153.

Arnáez Vadillo, J. (1987b). Factores de distribución de grandes movimientos en masa en el Sistema Ibérico Riojano. *Estudios Geográficos*, 189: 535-552.

Arnáez Vadillo, J. (1989). Incisiones (cárcavas) en el nivel supraforestal de la Sierra de la Demanda (Sistema Ibérico). *Cuadernos de Investigación Geográfica*. 15 (1-2): 7-16.

Arnáez Vadillo, J. (1990). Dinámica y organización espacial de los procesos de evolución de vertientes en montaña. En: *Geoecología de las áreas de montaña* (García Ruiz, J.M., Edr.). Geoforma Ediciones, pp. 33-47, Logroño.

Arnáez Vadillo, J. y García Ruiz, J.M. (1984). Tipos de escorrentía y ritmo de evacuación de sedimentos en la Sierra de la Demanda (Sistema Ibérico). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 10 (1-2): 7-15.

Arnáez Vadillo, J. y García Ruiz, J.M. (1990). *Mapa Geomorfológico de Ezcaray*. Escala 1:50.000. Geoforma Ediciones, 28 pp.+ mapa, Logroño.

Arnáez Vadillo, J., Larrea, V. y Ortigosa, L. (1991). Environmental and topographical controls in geomorphological evolution of hill-roads (Iberian System, Spain). En: *Soil Erosion Studies in Spain* (Sala, M. Rubio, J.L. y García-Ruiz, J.M., Edrs.). Geoforma Ediciones, pp. 27-39, Logroño.

Arnáez Vadillo, J., Ortigosa, L. y Oserín, M. (1992). Descripción y cuantificación de procesos de erosión en bancales abandonados. En *Estudios de Geomorfología en España* (López Bermúdez, F, Conesa, C. y Romero, M.A., Edrs). Sociedad Española de Geomorfología, pp. 193-202, Murcia.

Arnáez Vadillo, J. y Larrea, V. (1994). Erosion models and hydrogeomorphological functioning on hill-roads (Iberian System, La Rioja, Spain). *Zeitschrift für Geomorphologie,* 38 (3): 343-354.

Arnáez Vadillo, J. y Larrea, V. (1995). Erosion processes and rates on road-sides of hill-roads (Iberian System, La Rioja, Spain). *Physics and Chemistry of the Earth,* 20 (3-4): 395-401.

Arnáez, J., Ruiz-Flaño, P. y Lasanta, T. (1996). Comportamiento hidrogeomorfológico de los microambientes de campos abandonados con lluvias intensas: experiencias en el valle de Aísa. *Cadernos de Laboratorio Xeolóxico de Laxe,* 21: 659-669.

Arnáez Vadillo, J. y García-Ruiz, J.M. (2000). El periglaciarismo en el Sistema Ibérico Noroccidental. En: *Procesos y formas periglaciares en la montaña mediterránea* (Peña, J.L., Sánchez Fabre, M y Lozano, M.V., Edrs.). Instituto de Estudios Turolenses, pp. 113-126, Teruel.

Arnáez Vadillo, J., Larrea Sáenz, V. y Ortigosa Izquierdo, L. (2003). Surface runoff and soil erosion on unpaved forest roads from rainfall simulation tests in northeastern Spain. *Catena,* 57 (1):1-14.

Ayala-Carcedo, F.J. (1993). Socioeconomic impacts and vulnerability in slope movements. *Report of the Proceedings of the US Spain Workshop on Natural Hazards,* pp. 235-254, Barcelona

Baeza, C. y Corominas, J. (2001). Assesment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate stastical techniques. *Earth, Surface Processes and Landforms*, 26 (12): 1251-1363.

Bansal, R.C. y Mathur, H.N. (1976). Landslides, the nightmare of the hill roads. *Soil Conservation Digest*, 4 (1): 36-37.

Batalla, R.J., Sala, M. y Werrity, A. (1995). Sediment budget formed in solid material transport in a subhumid Mediterranian drainage basin. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 39 (2): 249-269.

Bellito, M. y Burroughs, E. (1990). *The effect of reduced tire pressure on sediment production from a forest road.* U.S. Department of Agriculture. Forest Service, Intermountain Research Station. Idaho, U.S.A.

Benito, G., Gutiérrez, M. y Sancho, C. (1988). Perfiladores de microtopografías para control de secciones transversales de canales. En: *Métodos y técnicas para la medición en el campo de procesos geomorfológicos* (Sala, M. y Gallart, F., Edrs.). Monografía de la Sociedad Española de Geomorfología, 1, pp. 54-57, Zaragoza.

Benito, G., Gutiérrez, M. y Sancho, C. (1991). Erosion patterns in rill and interrill areas in badlands zones of middle Ebro Basin (Spain). En: *Soil Erosion Studies in Spain* (Sala, M., Rubio, J.L. y García Ruiz, J.M., Edrs.). Geoforma Ediciones, pp. 41-54, Logroño.

Bloom, A.L. (1998). *An Assessment of road removal and erosion control treatment effectiveness: a comparation of 1997 storm erosion response between treated and untreated roads in Redwood Creek Basin, Northestern California,* MSc. Thesis, Humboldt State University, Arcata, California.

Bowling, L.C. y Lettenmeier, D.P. (1997). *Evaluation of the effects of forest roads on streamflow in Hard and Ware Creeks, Washington.* Water Resource Service. Tech. Rep. 155, pp. 189, Seattle.

Bowling, L.C.R. y Lettenmaier, D.P. (2001). The effects of forest roads and harvest on catchments hydrology in a mountainous maritime environment. En: *Land Use and*

Watersheds: Human Influence on Hydrology and Geomorphology in Urban and Forest Areas. Water Science and Application, vol. 2. (Wigmosta, M. y Burges, S., Edrs.), American Geophysical Union, pp. 145-164, Washington, D.C.

Brabb, E.E. (1984). Innovative approaches to landslide hazard mapping. Proceed. *IV Int. Symp. Landslides,* V1, 307-324, Toronto.

Brabb, E.E. y Harrod, B.L., (Edrs.) (1989). *Landslides: extent and economic significance. Balkema,* Rotterdam, 385 pp.

Brooks, S.M. y Collison, A.J.C. (1996). The significance of soil profile differentiation to hydrological response and slope instability: a modeling approach, En: *Advances in Hillslope Processes,* vol. 2. (Anderson, M.G., Brooks, S.M., Edrs), pp. 471-486, Wiley, Chichester.

Brunori, F., Casagli, S. y Fiaschi, S. (1996). Landslide hazard mapping in Tuscany, Italy: an example of automatic evaluation. En: *Geomorphic Hazards* (Slaymaker, O., Edr.). Wiley.

Brunsden, D. *et al.* (1981). The geomorphological character of part of the Low Himalaya of Eastern Nepal. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Suppl. 27: 25-72.

Brunton, D.A. y Bryan, R.B. (2000). Rill network development and sediment budgets. *Earth Surface Processes and Landforms,* 25: 783-800.

Burroughs, E.R., Chalfant, G.R. y Townsend, M.A. (1976). *Slope stability in road construction: a guide to the construction of stable roads in western Oregon and northen California. Portland, OR.* US Department of the Interior, Bureau of Land Management, 102 pp.

Burroughs, E.R., Watts, F.J. y Haber, D.F. (1984). Surfacing to reduce erosion of forest roads built in granitic soils. In: *Symposium on effects of forest land use on erosion and slope stability* (O`Loughlin, C.L. y Pearce, S.J., Edrs.). University of Hawaii, Environment and Policy Institute, pp. 255-264.

Burroughs, E.R. y King, J.G. (1989). Reduction of soil erosion on forests roads. *Gen. Tech. Rep. INT-264. Ogden, UT*. US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, pp. 21.

Burroughs, E.R., Folz, R.B. y Robichaud, P.R. (1991). United States Forest Service Research on sediment production from forest roads and timber harvest areas. *Revue Forestière Francaise.* Serie, Nº2, pp. 189-193, Paris.

Calvo Cases, A. (1987). *Geomorfología de laderas en la montaña del País Valenciano*. Institutció Valenciana d´Estudis i Investigació, pp. 303, Valencia.

Cañas, I y Ruiz, M. A. (2001). Técnicas de estudio de impacto paisajístico de las infraestructuras lineales. En: *Gestión sostenible de paisajes rurales*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. 121-145 pp.

Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V. y Reichenbach, P. (1991). GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard*. Earth Surface Processes and Landforms*,16: 427-445.

Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F. y Reichenbach, P. (1995). GIS-Based techniques for mapping lanslide hazard. En: *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards.* Academic Pub., Dordrecht, the Netherlands. (http:// deis158.deis.unibo.it/gis/).

Carson, M.A. y Kirkby, M.J. (1972). *Hillslope Form and Process*. Cambridge University Press. London

Casas Sáinz, A.M., Gil Imaz, A. y Muñoz Jiménez, A. (1995). *Guía geológica de los valles del Leza y Jubera*. Geoforma Ediciones, 107 pp., Logroño

Casale R. y Margottini C. (Eds.) (1999). *Floods and Landslides. Integrated Risk Assessment.* Springer-Verlag, 373 pp.

Cerdá, A. (1993). *La infiltración en los suelos del País Valenciano. Factores y variaciones espaciales.* Ph.D. Universitat de Valencia, 357 pp.

Cerdá, A. (1994). Influencia de la exposición sobre la producción de sedimentos y escorrentías en ambientes semiáridos. *Cuadernos de Investigación Geográfica,* 20-21: 23-45.

Cerdà, A., y García-Fayos, P. (1994). Relaciones entre las pérdidas de agua, suelo y semillas en zonas acarcavadas. Influencia de la pendiente. *Cuadernos de Investigación Geográfica,* 20-21: 47-63.

Chacón Montero, J. (2003). Riesgos de origen geológico y geomorfológico: deslizamientos de tierras, identificación, análisis y prevención de sus consecuencias. En: Los procesos

de riesgo con origen natural: una constante en la relación entre hombre y medio. *Revista de Ciencias Sociales,* 23. Universidad de Murcia y Fundación Caja Murcia, pp. 33-64 pp.

Chorley, R.J. (1978). The hillslope hidrology cycle. In: *Hillslope Hidrology* (Kirby, M.J. Ed.). Wiley and son. London.

Clayton, J.L. (1983). *Evaluating slope stability prior to road construction*. Res. Pap. INT-307. Ogden, UT. US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 6 pp.

Clotet, N. y Gallart, F. (1986). Sediment yield in a mountainous basin under high mediterranean climate. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 60: 205-216.

Coker, R.J. y Fahey, B.D. (1993). Road–related mass movement in weathered granite, Golden Downs and Motueka forests, New Zealand: a note. *Journal of Hydrology*, 31: 65-69.

Colchen, M. (1974). *Geología de la Sierra de la Demanda. Burgos Logroño*. Memoria Instituto Geológico y Minero de España. t. 85., Madrid.

Collison, J.C. y Anderson, M.G. (1996). Using a combined slope hidrology/stability model to indentify suitable conditions for landslide prevention by vegetation in the humid tropic. *Earth, Surface Processes and Landforms*, 21 (8): 737-747.

Collison, J.C., Anderson, M.G. y Lloyd, D.M. (1995). The impact of vegetation on slope stability in a humid tropical environment- a modelling approach. *Institution of Civil Engineers, Water, Maritime and Energy,* 112: 168-175.

Crozier, M.J. (1986). *Landslides: causes, consequences and enviroment*. Croom Helm. 252 pp. London.

Crozier, M.J. (1999). Prediction of rainfall-triggered landslides: a test of the antecedent water status model. *Earth, Surface Processes and Landforms*, 24 (9): 825-833.

De Ploey, J. y Cruz, O. (1979). Landslide in the Serra do Mar, Brazil. *Catena,* 6: 11-122.

Del Barrio, G. (1990). El régimen térmico estacional en alta montaña. En: *Geoecología de las áreas de montaña* (García Ruiz, J.M., Edr). Geoforma Ediciones, Logroño

Del Reguero, M., (1990). *Ecología y consumo*. Questio, Madrid.

Descroix, l., Viramontes, D., Vauclin, M., González Barrios, J.L., y Esteves, M. (2001): Influence of soil surface features and vegetation on runoff and erosion in the Western Sierra Madre (Durango Northwest México). *Catena,* 32: 115-135.

Díaz de Rada Iguzquiza, V. (2002). *Técnicas de análisis multivariante para investigación social y comercial.* Ejemplos prácticos utilizando SPSS versión 11. Rama, Madrid.

Diseker, E.G. y Richardson, E.C. (1962). Erosion rates and control methods on Highway Cuts. *Transactions of the A.S.A.E.,* 5: 153-155.

Diseker, E.G. y Mcginnis, J.T. (1967). Evaluation of climatic, slope and site factors on erosion from unprotected roadbanks. *Transactions of A.S.A.E.,* 10 (1): 9-14.

Diseker, E.G. y Rihardson, E.C. (1971). Predicting sediment yield from roadbanks. *Transactions of A.S.A.E.,* 14 (1): 102-105.

Dunne, T. (1978). Field studies of hillslope flow processes. In: *Hillslope Hidrology* (Kirkby, M.J., Ed.). Wiley and son. London.

Dunne, T. y Leopold, L.B. (1978*). Water in environmental planning*. Freeman and Co. pp. 818. San Francisco.

Eck, R.W. y Morgan, P.J. (1987). Culverts versus dips in the Apalachian Region: a performance-based decision-making guide. En: *Fourth International Conference on Low-Volume Roads*. Volume 2, Transportation Research Record 1106; pp. 330-340.

Elorrieta Jove J. (1989). *Clasificación de pistas forestales*. Documento interno. Madrid.

Elorrieta Jove, J., Domínguez, M. B. y Navarro, M. (2001). *Infraestructura viaria adecuada a la repoblación forestal.* En: http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/ponencias/21.htm

Erismann, T.H. y Abele, G. (2001). *Dynamics of rockslides and rockfalls*. Springer Verlag, 316 pp.

Esteves, M., Planchon, O., Lapetite, J.M., Silvera, N. y Cadet, P. (2000). The “EMIRE” large rainfall simulator: design and field testing. En: *Earth Surface Processes and Landforms,* 25: 681-690.

F.A.O. (1989). *Watershed Management Manual. Road design and construction in sensitive watersheds*. 196 pp.. Roma.

Fernández Aldana, R., Lopo, L. y Rodríguez , R. (1989). *Mapa forestal de La Rioja*. Gobierno de La Rioja. Serie Estudios nº 18, 72 pp., Logroño.

Flageollet, J.C. (1999). Landslide hazard: a conceptual approach in risk viewpoint. In: *Floods and landslidies: integrated risk assessment*. (Casale, R. y Margottini, C., Edrs.), Springer.

Folch i Guillén, R. (1977). El caso de las carreteras de montaña. *Sobre Ecologismo y Ecología aplicada*. Ed. Ketres, pp. 169-185, Barcelona.

Fookes, P.G., Sweeney, M., Manby, C.N.D., y Martin, R.F. (1985). Geological and geotechnical engineering aspects of lowcost roads in mountainous terrain. *Engineering Geology*, 21: 1-152.

Forman, R.T.T., Friedman, D.S., Fitzhery, D. (1997). Ecological effects of roads: toward three summary indices and an overview for North America. En: *Proceedings of the international conference, Habitat fragmentation, infrastructure and the role of ecological engineering*. (Canters, K., Piepers, A., Hendriks-Heersma, D. Edrs.), pp 40-54, Maastricht, The Netherlands.

Foster, I.D.L., Fullen, M.A., Brandsma, R.T. y Chadman, A.S. (2000). Drip-screen rainfall simulators for hydro and pedo geomorphological research: the Coventry experience. *Earth Surface Processes and Landforms,* 25: 691-707.

Fransen, P.J.B., Phillips, C.J. y Fahey, D. (2001). Forest road erosion in New Zealand: overview. *Earth Surfaces Processes and Landforms*, 26:165-174.

Frediksen, R.L. (1970). Erosion and sedimentation following road construction and timber harvest on unstable soils in three small western Oregon watersheds. *USDA Forest Service Res. Paper* PNW 195, 15 pp.

Froehlich, W. (1991). Sediment production from unmetalled road surfaces. *Sediment and Stream Water quality in a changing Environment: Trends an Explanation.* Proceedings of the Vienna Symposium. IAHS Publ. 203.

Froehlich, W. (1995). Sediment dynamics in the Polish Flysh Carpatians. En*: Sediment and Water Quality in River Catchments.* (Foster, I.D.L., Gurnell, A.M. y Web, B.W., Edrs.). John Wiley and Sons, pp. 453-461.

Fukushima, Y. (1987). Estimating discharge and sediment yield from a forest road. In: *Erosion and sedimentation in the Pacific Rim. Proceedings of The Corvallis Symposium. IAHS* Publ., pp. 265-266.

Gallart Gallego, F. (1990). El papel de los sucesos lluviosos de baja frecuencia en la evolución geomorfológica de las áreas montañosas. En: *Geoecología de las áreas de montaña* (García Ruiz, Edr.). Geoforma Ediciones. Logroño. 95-113.

García Ruiz, J.M. (1979). El glaciarismo cuaternario en la Sierra de la Demanda (Logroño y Burgos, España). *Cuadernos de investigación (Geografía e Historia)*, 5 (2), Logroño.

García Ruiz, J.M. y Arnáez Vadillo, J. (1984). Infiltration et piping dans la Sierra de la Demanda. En: *Ecologie et biogèographie des milieux montagnards*. Pau.

García Ruiz, J.M., Lasanta Martínez, T. y Sobrón García, I. (1985*). Estudio comparativo de la evolución geomorfológica de campos abandonados y áreas repobladas de la cuenca del Jubera.* Informe. Comunidad Autónoma de La Rioja. 317 pp., Logroño.

García Ruiz, J.M., Arnáez Vadillo, J., Ortigosa, L. y Gómez Villar, A. (1988). Debris flow subsequent to a forest fire in Najerilla river valley (Iberian System, Spain). *Pirineos*, 131: 3-24.

García Ruiz, J.M. y Arnáez Vadillo, J. (1991). *Mapa Geomorfológico de Munilla*. Geoforma Ediciones, 26 pp.+ mapa, Logroño.

García Ruiz, J.M. y Martín Ranz, M.C. (1992). *El régimen de los ríos de La Rioja.* Instituto de Estudios Riojanos, 69 pp., Logroño.

García Ruiz, J.M., Ruiz Flaño, P. y Ortigosa, L. (1992). Geomorphological evolution of abandoned fields. A case study in the Central Pyrenees. *Catena,* 19 (3-4):301-308.

García Ruiz, J.M., Ortigosa, L., Arnáez, J. y Pellicer, F. (1998). Geomorfología glaciar del Sistema Ibérico. En: *Las huellas glaciares de las montañas españolas* (Gómez Ortiz, A. y Pérez Alberti, A., Edrs.) Universidad de Santiago de Compostela, pp. 349-381, Santiago de Compostela

García y García, A.I., Martínez, V., Regoyos, M. y Ayuga, F. (2002). Simulación de eventos hidrológicos en pequeñas cuencas hidrográficas. En: *Los Sistemas de Información Geográfica en la gestión de los riesgos geológicos y el medio ambiente* (Lain Huerta, L.

Edr.). Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Medio Ambiente. Riesgos Geológicos. nº 3. Ministerio de Ciencia y Tecnología.

Gardner, R.B. (1978). Some environmental and economic effects of alternate forest road designs. American Society of Agricultural Engineers *Transactions of the ASAE.* 22(1):63-68.

Gil-Docampo, M.L., Armesto, J. y Cañas, I. (2003). Caracterización de vías rurales a partir de la visualización de imágenes Landsat TM y Spot P. *Revista de Teledetección*, 19:19-29.

Gil, W. y Martos, J. (1989). *Aspectos ecológicos del aprovechamiento maderero. Comunicación interna.* E.T.S.I. Montes. Madrid.

González Moradas, M.R. y Lima de Montes, Y. (2001). Cartografía del riesgo a los deslizamientos en la zona central del Principado de Asturias. *Mapping*, Nº 73:6-15.

González Moradas, M.R. y Lima de Montes, Y., (2001). Método de validación del análisis SIG para la obtención de mapas de susceptibilidad a deslizamientos. *Topografía y Cartografía*, V18 Nº 105: 12-18.

Gonzalo Moreno, A.N. (1981). *El relieve de La Rioja. Análisis de Geomorfología estructural*. Instituto de Estudios Riojanos, 2 vol., Logroño.

Gordi Serrat, J. (1992). La frecuentación en los espacios naturales protegidos. Reflexiones a partir del estudio de los parques naturales de Cataluña. *Estudios Geográficos*, 209: 593-608.

Grant, G.E. y Wolf, (1991). Long-term patterns of sediment transport after timber harvest, western Cascade Mountains, Oregon U.S.A. En: *Sediment and stream water quality in changing envieronment: trends and explantations.* Proceedings of the Vienna Symposiun. IAHS Publication, nº 203: 31-40.

Guerra, A., Monturiol, F., Badorrey, T., Gallardo, J., Carlevaris, J.J., de la Horra, J.L. y Labrandero, J.L. (1970). *Mapas de suelos de las provincias de Zaragoza, Huesca y Logroño.* Escala 1:250.000. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 68 pp., Madrid.

Gullison, R.E. y Hardner, J.J. (1993). The effects of road design and harvest intensity on forest damage caused by selective logging: empirical results and simulation model from the Bosque Chimanes, Bolivia. *Forest Ecology and Management*, 59 (1/2):1-14.

Gucinski H., Brookes, M.H., Furniss, M.J., Ziemer R.R. y Brookes, M.H. (Edrs.), (2001). *Forest Roads: A Synthesis of Scientific Information.* USDA FS, Pacific Northwest Research Station, General Technical Report PNW-GTR-509, 103 pp., Portland, Oregon.

Haber, W. (1990). Using landscape ecology in planning and management. En: *Changing landscapes: an ecological perspective* (Zonneveld, I.S. y Forman, R.T.T., Edrs.) Springer Verlag, pp. 217-232. New York.

Haefli, J. (1948). The stability of slopes acted upon parallel seepage. *Proceedings, 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1:138-148.

Haigh, M.J. (1977). *The use of erosion pins in the study of slope evolution*. British Geomorphological Research Group. Technical Bulletin, 18: 31-49.

Haigh, M.J. (1978). Microrills and dessication cracks: some observation. *Zeitschrift für Geomorfhologie*, 22 (4): 457-461.

Haigh, M.J. (1984a). Landslide prediction and highway maintenance in the Lesser Himalaya, India. *Zeitschrift für Geomorphologie*. suppl. Bd. 51: 17-37.

Haigh, M.J. (1984b). Prediction and morphology of road-induced landslides in the Himalaya. En: *Rural Development in the Himalaya: Problems and Prospect* (Joshi, S.C., Joshi, D.R. y Dani, D.D., Edrs.). Gianodaya Prakashan, Nainital, 176-206 pp.

Haigh, M.J. (1989). Environmental indicators of landslide activity along the Kilbury road, Nainital, Kumaun Lesser Himalaya. *Mountain Research and Development*, 9 (1): 25-33.

Haigh, M.J., Rawat, J.S. y Bartarya, S.K., (1987). Impact of hillroads on downslope forest cover. Himalaya: *Man and Nature*, 11 (4): 2-3.

Haigh, M.J., Rawat, J.S., y Bartarya, S.K. (1988). Environmental correlation of landslide frecuency along new highways in the Himalaya: preliminary results. *Catena*, 15: 539-553.

Haigarth, P.H., Rowley, C., Perry, S. y Bunce, R.G.H. (1993). Accelerated Soil-Erosion in the Picos de Europa. *Environmental Conservation*.

Hall, C.A.S., Stanford, J.A. y Hauer, F.R. (1992). The distribution and abundance of organisms as a consequence of energy balances along multiple environmental gradients. *Oikos,* 65(3): 377-390.

Hansen, E.A. (1971). *Sediment in a Michigan trout stream: its source, movement, and some effects on fish habitat.* Res. Pap. NC-59. St. Paul, MN: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station. 14 pp.

Hansen, A. (1984). Landslide hazard analysis, En: *Slope instability* (Brunsden D. and Prior D.B., Edrs.), Wiley, pp. 523-602, New York,

Harr, R.D., Harper, W.C., Krygier, J.T. y Hseih, F.S. (1975). Changes in storm hydrographs after road building and clear-cutting in the Oregon Coast Range. *Water Resources Research,* 11(3): 436-444.

Hattinger, J., (1984). Influencia de las carreteras forestales en el aumento de la sedimentación y los deslizamientos de tierra a causa de la escorrentía. En *Planificación de Carreteras Forestales y Sistemas de Aprovechamiento* (McNally, J.A. et al. Edrs.) F.A.O. Roma.

Haupt, H.F. (1959). Road and slope characteristics affecting sediment movement from logging roads. *Journal of Forestry*, 57(5): 329-332.

Henkel, D.J. y Skempton, A.W. (1954). A landslide at Jackfield, Shropshire, in an over-consolidated clay. *Proceedings of the Conference on the Stability of Earth Slopes, Stockholm*, 1, 90-101.

Hewlett, J.D. y Douglass, J.E. (1968). *Blending forest uses*. Research Paper SE-37. U.S.D.A. Forest Service, Washington, DC.

Hoeck, E., Kaiser, P.K. y Bawden (2000). Analysis of rockfall hazards. En: *Practical Rock Engineering*. Balkema Publishers (http://www.rockscience.com/hoek/pdf/)

Hoover, M.D. (1952). Water and timber management. *Journal of Soil and Water Conservation*, 7: 75-78.

Hornbeck, J.W., Martin, C.W. y Eagar, C. (1997). Summary of water yield experiments at Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire. *Canadian Journal of Forest Research,* 27(12): 2043-2052.

ICONA (1983). *Planificación y proyecto de vías forestales*. M.A.P.A., Madrid.

ICONA (1987). *Planteamiento y cuestionario y evaluación de impacto ecológico*. Circular nº 1. M.A.P.A., 16 pp., Madrid.

IGME (1980). *Mapa Geológico de España, Logroño*. E. 1:200.000. Instituto Geológico y Minero de España. Mem. 26 pp., Madrid.

IGME (1978). *Mapa Geológico de Ezcaray.* E. 1:50.000. Instituto Geológico y Minero de España. Mem. 51 pp., Madrid.

IGME (1982). *Mapa Geológico de Villoslada de Cameros.* E. 1:50.000. Instituto Geológico y Minero de España. Mem. 38 pp., Madrid.

IGME (1982). *Mapa Geológico de Munilla*. E. 1:50.000. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.

IGME (1982). *Mapa Geológico de Cervera del Río Alhama.* E. 1:50.000. Instituto Geológico y Minero de España. Mem. 41 pp., Madrid.

IGME (1988). *Impacto económico y social de los riesgos geológicos en España*. 92 pp. Madrid.

Jardi, M., Cabanillas, M., Fernando, C. y Peña Rabadán, J.C. (1996). Impacto de las pistas forestales en medios frágiles mediterráneos. El caso de Turó de Burriach (Maresme-Barcelona, España). *Cadernos Xeoloxico de Laxe,* 21:103-121.

Jones, D.K.C. Brunsden, D. y Goudie, A.S. (1983). A preliminary geomorphological assessment of part of the Karakoram Highway. *Q.J. Eng. Geol.,* 16: 331-335.

Jones, J.A. y Grant, G.E. (1996). Peak flow responses to clear-cutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon. *Water Resources Research*, 32(4): 959-974.

Kahklen, K. (2001). *A method for measuring sediment production from forest roads.* USDA, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Research Note PNW-RN-529.

Khaire, V. A. (1975). SPR Project in Nepal. *J. Indian Roads Congr*., 35(4): 725-851.

King, J.G. y Tennyson, L.C. (1984). Alteration of streamflow characteristics following road construction in north-central Idaho. *Water Resources Research*, 20(8): 1159-1163.

Kirkby, M.J. (1988). Hillslope runoff processes and models. *Journal of Hydrology*, 100: 315-339.

Kochenderfer, J.N. y Helvey, J.D. (1987). Using gravel to reduce soil losses from minimun-standard forest roads. *Journal of Soil and Water Conservation*, 42(1): 46-50.

Laín Huerta, L. (Edr) (2002). *Los sistemas de información geográfica en la gestión de los riesgos geológicos y el medio ambiente*. Instituto Geológico y Minero de España, Ministerio de Ciencia y Tecnología, Madrid.

Larrea Sáenz, V. y Arnáez Vadillo, J. (1994). Primeros resultados sobre tasas de erosión en taludes de pistas forestales: el ejemplo de Santa Marina (Sistema Ibérico, La Rioja, España). En: *Estudios de Geomorfología en España,* Tomo II (Arnáez-Vadillo, J., García Ruiz, J.M. y Gómez Villar, A., Edrs.). Sociedad Española de Geomorfología, pp. 69-79, Logroño.

Larrea Sáenz, V., Arnáez, J. y Ortigosa, L. (1995). Revegetación natural en taludes de pistas forestales (Sistema Ibérico, La Rioja, España) *Cuadernos de Investigación Geográfica,* 20-21: 85-98. Logroño.

Larrea Sáenz, V. y Arnáez, J. (1996). Dinámica geomorfológica en pistas forestales de montaña: resultados en el Sistema Ibérico occidental (La Rioja, España). *Zubía.* Monográfico, 8: 87-106.

Lasanta Martínez, T. (1990). Diversidad de usos e integración espacial en la gestión tradicional del territorio en las montañas de Europa Occidental. En: *Geoecología de las áreas de montaña* (García Ruiz, J.M., Ed.). Geoforma Ediciones, pp. 235-252, Logroño.

Lasanta, T., Arnáez, J., Ruiz, P. y Ortigosa, L. (1989). Evolución superficial del espacio cultivado en Cameros Viejo (Sistema Ibérico) y su relación con algunos factores geoecológicos. *Estudios geográficos*, 189: 553-572, Logroño.

Lasanta Martínez, T. y Ruiz Flaño, P. (1990). Especialización productiva y desarticulación espacial en la gestión reciente del territorio en la montaña de Europa Occidental. En: *Geoecología de las áreas de montaña* (García Ruiz, J.M. Ed.). Geoforma Ediciones, pp. 267-296, Logroño.

Lasanta, T., García-Ruiz, J.M., Pérez-Rontomé, C. y Sancho, C. (2000). Runoff and sediment yield in a semi-arid environment: the effect of land management after farmland abandonment, *Catena*, 38: 256-278.

Lasanta, T., Arnáez, J., Oserin, M. y Ortigosa, L. (2001). Marginal lands and erosion in terraced fields in the Mediterranean Mountains. A case study in the Camero Viejo (Northwestern Iberian System, Spain). *Mountain Research and Development*, 21 (1): 55-62

Lascelles, B., Favis-Morlock D.T., Parsons, A.J. y Guerra, A.J.T. (2000). Spatial and temporal variation in two rainfall simulators: implications for spatially explicit rainfall simulation experiments. *Earth Surface Processes and Landforms,* 25: 709-721.

Larsen, M.C. y Parks J.E. (1997). How wide is a Road? The association of roads and mass-wasting in a forested mountain environment. *Earth Surface Processes and Landforms,* 22 (9): 835-848.

Lee, D.C., Sedell, J.R., Rieman, B.E. (1997). Broadscale assessment of aquatic species and habitats. En: *An assessment of ecosystem components in the interior Columbia basin and portions of the Klamath and Great Basins.* volume III. (Quigley, T.M., Arbelbide, S.J., Eds). Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-405. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, pp. 1057-1496, Portland, OR.

Lin, Y.L. (1987). Erosional effects of road construction in Pi-Lu Experimental Watershed. En: *Erosion and sedimentation in the Pacific Rim. Proceedings of the Corvallis Symposium. IAHS*. *Publ.,* 267-268 pp.

Luce, C.H. y Cundy, T.W. (1994). Parameter identification for a runoff model for forest roads in Wisconsin. *Wildlife Society Bulletin*, 24(1):71-76.

Luce, Ch.H. y Black, T.A. (2001). Spatial and temporal patterns in erosion from forest roads. En: *Land Use and Watersheds: Human Influence on Hydrology and Geomorphology in Urban and Forest Areas. Water Science and Application,* vol. 2. (Wigmosta, M., y Burges, S., Eds.), American Geophysical Union, pp.165–178. Washington, D.C.

Lugo, A.E. y Gucinski, H. (2000). Function, effects and management of forest roads. *Forest Ecology and Management,* 133: 249-262

Machín Gayarre, J. (1994). Los suelos de La Rioja. En: *Geografía de La Rioja*, vol. 1 Geografía Física. (García Ruiz, J.M. y Arnáez Vadillo, J. coord.), Fundación Caja Rioja, 243-265.

Madej, M.A. (2001). Erosion and sediment delivery following removal of forest roads. *Earth Surfaces Processes and Landforms,* 26: 175-190.

Martín Ranz, M.C. y García Ruiz, J.M. (1984). *Los ríos de La Rioja: introducción al estudio de su régimen.* Instituto de Estudios Riojanos. Logroño.

Martínez-Alegría, R., Lanaja, J.M., Ordóñez, C, y Taboada, J. (1998). Characterization of unstable areas in the confluence of Pisuerga and Duero Rivers. *International Conference on GIS for Earth Science Applications,* pp.135-142, Ljubliana.

Mcfero, J. (1998). Sediment export from forest road turn-outs: a study design and preliminary results. *Presentation at ASAE Annual International Meeting.* Orlando, Florida.

Megahan, W.F. (1972). Subsurface flow interception by a logging road in mountains of central Idaho. *Proceedings of a symposium on watersheds in transition* (Csallany, C., McLaughlin, T.G. y Striffler, W.D., Eds.). American Water Resources Association, pp. 350-356. Fort Collins, CO.

Megahan, W.F. (1974). *Erosion over time on severely disturbed granitic soils: a model.* Gen. Tech. Rep. INT-156. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station,14 pp.

Megahan, W.F. (1988a). Effects of forest roads on watershed function in mountainous areas. En: *Symposiun on environmental geotechnics and problematic soils and rocks* (Balasubraniam, Y. Ed.). Balkema, pp. 335-348.

Megahan, W.F. (1988b). Roads and forest site productivity. En: *Degradation of forested land: forest soils at risk. Proceedings of the 10th BC soil science workshop* (Lousier, J.D., y Still, G.W. Eds.). British Columbia Ministry of Forests, pp. 54-65.

Megahan, W.F. y Kidd, W.J. (1972). *Effect of logging roads on sediment production rates in the Idaho batholit.* Res. Pap. INT-123. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 14 pp.

Megahan, W.F., Day, N.F. y Bliss, T.M (1978). Landslide ocurrence in the western and central northern Rocky Mountain physiographic province in Idaho. *Proceedings of the 5th North American forest soils conference* (Youngberg, C.T., Ed.). Colorado State University, pp.116-139.

Megahan, W.F., Seyedbagheri, K.A., Moski, J.L. y Hetchenson, G.L. (1986). Construction phase sediment budget for forest road on granitic slope in Idaho. *Drainage basin sediment delivery* (Hadley, R. F., Ed.). IAHS Publication, 159: 31-39.

Megahan, W.F., Potyondy, J.P. y Seyedbagheri, K.A. (1992). Best management practices and cumulative effects from sedimentation in the South Fork Salmon River: an Idaho case study. En: *Watershed management: balancing sustainability and environmental change* (Naiman, R.B., Ed.). Springer-Verlag, pp., 401-414, New York.

Megahan, W.F. y Ketchenson, G.L. (1996). Predicting downslope travel of granitic sediments from forest roads in Idaho. *Water Resources Bulletin*, 32(2): 371-382.

Megahan, W.F., Wilson, M. y Monsen, S. (2001). Sediment production from granitic cutslopes on forest roads of Idaho, USA. *Earth Surface Processes and Landforms,* 26 (2):153-163.

Miller, D.J. y Sias, J., (1999). Deciphering large landslides: linking hydrological, groundwater and slope stability models through GIS. In: *Hidrological Applications of GIS*. (Gurnell, A.M. y Montgomery, D.R., Eds.). John Wiley & Sons Ltd., pp. 103-121.

Mladenoff, D.J., Sickley, T.A., Haight, R.G. y Wydevens, A.P. (1995). A regional landscape analysis and prediction of favorable grey wolf habitat in the northern Great Lakes region. *Conservation Biology,* 9(2): 279-294.

Montgomery, D.R. (1994). Road surface drainage, channel initiation, and slope instability. *Water Resources Research*, 30(6): 1925-1932.

Montgomery, D.R. y Dietrich, W.E. (1994). A physically based model for the topographic control on shallow landslide. *Water Resourc. Res.* 30 (4): 1153-1171.

Montgomery, D.R., Sullivan, K. y Greenberg, M. (1999). Regional test of a model for shallow landsliding. In: *Hidrological Applications of GIS* (Gurnell, A.M. y Montgomery, D.R., Eds). John Wiley & Sons Ltd., pp. 123-135.

M.O.P.T. (1991). *El paisaje.* Coord. Escribano Bombín, Mª Milagro. Unidades Temáticas Ambientales de la Secretaría de Estado para las Políticas del Agua y el Medio Ambiente. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. 117 pp. Madrid.

M.O.P.U. (1989). *Guías metodológicas para la elaboración de estudios de impacto ambiental: 1 carreteras y ferrocarriles.* Elaboración y redacción: Suárez Cardona, F., Monografías de la Dirección General de Medio Ambiente, M.O.P.U., 165 pp., Madrid.

Murphy, A.S., (1985). *Minimizing forest road construction environmental impact*. New England Regional Council on Forest Engineering, NER. COFE Roads and Structures Workshop, University of Maine, 5-10 pp.

Musgrave, G.W. y Holtan, H.N. (1964). Infiltration. En: *Handbook of Applied Hidrology*, (Chow, J., Ed.). McGraw-Hill. New York.

Nagygyor, S.A.M. (1984). *Construction of environmentally sound forest roads in the Pacific Northwest.* COFE/IUFO Conference, pp. 143-147, Maine.

Naiman, R.J. y Décamps, H. (1997). The ecology of interfaces: riparian zones. *Annual Review of Ecology and Systematics,* 28: 621-658.

Nuñez Olivera, E. y Martínez Abaigar, J. (1991). *El clima de La Rioja*. Consejería de Agricultura, Gobierno de La Rioja, Serie estudios 22, pp. 323, Logroño.

Navas, A., Alberto, F., Machín, J. y Galán, A. (1990). Design and operation of a rainfall simulator for field studies on runoff and soil erosion. *Soil Technology,* 3: 385-397.

Oliveira, E. (2002). Consideraciones sobre el uso de fotografías aéreas para la actualización automática de entidades lineales (carreteras) en Sistemas de Información Geográfica. *Mapping*, 75.

Ordóñez, C. y Martínez-Alegría R. (2003). *Sistemas de Información Geográfica: aplicaciones prácticas con Idrisi32 al análisis de riesgos naturales y problemáticas medioambientales.* Ra-ma. Madrid.

Ortega Villazán, M.T. (1993). *Clima del sector Norte de la Cordillera Ibérica: de la Sierra de la Demanda a la Sierra del Moncayo.* Estudios Geográficos, Secretaría de Publicaciones de la Universidad de Valladolid, Junta de Castilla y León.

Ortigosa Izquierdo, L. (1985). Los glaciares rocosos de la Sierra de Cebollera. *Actas del I Coloquio sobre Geografía de La Rioja*. Geografía Física, pp. 55-67, Logroño.

Ortigosa Izquierdo, L. (1986). *Geomorfología glaciar cuaternaria de la Sierra de Cebollera*. Instituto de Estudios Riojanos. Colección Ciencias de la Tierra. Geografía, pp. 77, Logroño.

Ortigosa Izquierdo, L. (1987). Las sequías climáticas en el extremo noroccidental de la Depresión del Ebro (La Rioja). *Estudios Geográficos*, 189: 339-658.

Ortigosa Izquierdo, L. (1991). *Las repoblaciones forestales en La Rioja: impactos y consecuencias ambientales.* Geoforma Ediciones, 140 pp., Logroño.

Ortigosa, L., Oserín, M. y Arnáez Vadillo, J. (1994): Comportamiento geomorfológico del espacio agrario abancalado en Camero Viejo (Sistema Ibérico): resultados de una modelización territorial. En: *Efectos Geomorfológicos de Campos Abandonados* (García-Ruiz, J.M. y Lasanta, T., Edrs.). Sociedad Española de Geomorfología, pp. 121-134.

Packer, P.E. (1967). Criteria for designing and location roads to control sediment. *Forest Science,* 13:1-18.

Patric, J.H. (1976). Soil erosion in the eastern forest. *Journal of Forestry*, 74(10): 671-677.

Pellicer Corellano, F. (1985). Modelado exokárstico de la plataforma de los Gamellones (Torrecilla de Cameros, La Rioja). *Actas del I Coloquio sobre Geografía de La Rioja*. Geografía Física. Instituto de Estudios Riojanos, pp. 43-54, Logroño.

Pérez Lorente, F., Pavía, S. y Pereda, C. (1989). Los conglomerados sueltos terciarios del borde de norte de la Sierra de Cameros. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 15 (1-2): 67-74.

Petersen, J.F. (2002). The role of road cuts, quarries, and other artificial exposures in geomorphology education. *Geomorphology*, 47: 289-301.

Poesen, J., Ingelmo-Sánchez, F. y Mucher, H. (1990). The hydrological response of soil surface to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the top layer. *Earth Surface Processes and Landforms,* 15 (7): 653-671.

Poesen, J. y Lavee, H. (1994): Rock fragments in top soils: significance and processes. *Catena*, 23 (1-2): 1-28.

Preston, N.J. y Crozier, M.J. (1999). Resistance to Shallow landslide failure through root-derived cohesion in East Coast Hill Country Soils, North Island, New Zeland. *Earth, Surface Processes and Landforms*, 24 (8): 665-675.

Quigley, T.M., Arbelbide, S.J. y Graham, R.T. (1997). An assessment of ecosystem components in the interior Columbia basin and portions of the Klamath and Great Basins: an introduction. En: *An assessment of ecosystem components in the interior Columbia*

basin and portions of the Klamath and Great Basins, volume 1 (Quigley, T.M., y Arbelbide, S.J., Eds.). Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-405. US, Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station: 1-98. Portland, OR.

Regües, D. y Gallart, F. (1996). Evolución de la respuesta hidrológica de un área arcillosa acarcavada en relación con el estudio físico superficial mediante experiencias de simulación de lluvia. *Cadernos do Laboratorio Xeoloxico de Laxe*, 21:79-89.

Reid, L.M. (1981). *Sediment production from gravel-surfaced forest roads, Clearwater basin, Washington.* Final report FRI-UW-8108. College of Fisheries, Fisheries Research Institute. University of Washington, 247 pp., Seatle.

Reid, L.M. y Dunne, T. (1984). Sediment production from forest road surfaces. *Water Resour. Res.*, 20 (11): 1753-1761.

Reid. L.M.., Ziemer, R.R. y Furniss, M.J. (1997). *What do we need to know about roads?* Unpublished manuscript. http://www.rsl.psw.fs.fed.us/projects/water/4Roads.htm

Reinhart, K.G., Eschner, A.R. y Trimble, G.R. (1963). *Effect on streamflow of four forest practices in the mountains of West Virginia.* Res. Pap. NE-1. Upper Darby, PA: US Departement of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station. 79 pp.

Rice, R.M. y Lewis, J. (1986). Identifying unstable sites on logging roads. En: *18th IUFRO World Congress, division 1, vol.1, Forest environment and silviculture*; Vienna, Austria: IUFRO Secretariat, pp. 239-247.

Rice, R.M. (1992). The science and politics of BMPs in forestry: California experiences. En: *Watershed management activities: balancing sustainability and environmental change* (Naiman, R.J. Ed.), Springer-Verlag, pp. 385-400, New York

Ries, J.B., Langer, M. y Rehberg, C. (2000). Experimental investigations on water and wind erosion on abandoned fields and arable land in the Central Ebro Basin, Aragón/Spain. *Zeitschrift für Geomorphologie,* Supp. Bd, 121: 91-108.

Rivas Martínez, S. (1984). Pisos bioclimáticos de España. *Lazaroa*, 5. Madrid. pp 33-43.

Rotaru, C. (1991). Exploitation Forestiere et sauvegarde de l`environnement. Actas del décimo Congreso Forestal Mundial. *Revue Forestière Francaise*, 2: 77-88.

Rudis, V.A. (1995). Regional forest fragmentation effects on bottomland hardwood community types and resource values*. Landscape Ecology,* 10(5): 291-307.

Ruiz Flaño, P. (1989). Análisis dendroclimático de Pinus uncinata Ramond en la Sierra de Cebollera (Sistema Ibérico). *Cuadernos de Investigación Geográfica,* 15 (1-2), 75-85.

Ruiz Flaño, P. (1993). *Procesos de erosión en campos abandonados del Pirineo.* Geoforma Ediciones, 191 pp. Logroño.

Sala, M. (1982). Metodología para el estudio y medición de los procesos de erosión actuales. *Notas de Geografía Física*, 8: 39-56.

Salinas González, F.J. y Velilla Lucini, M.C. (2002). Estudio por fotogrametría analítica del acantilado de la Fortaleza de Ibiza. *Mapping*, 81.

Samset, I. (1990). Forest Operations-Protection techniques. *Actas del Congreso de Montreal de IUFRO.* pp. 20-31. Montreal.

Sancho, C., Benito, G. y Gutierrez, M. (1991). Agujas de erosión y perfiladores microtopográficos. *Cuadernos Técnicos de la SEG,* 2. Geoforma Ediciones. Logroño.

Sancho Marcén, C. (1997). Los mapas de riesgos. En: *Cartografía geomorfológica básica y aplicada* (Peña Monné, J.L., Ed.). Ediciones Geoforma, Logroño.

Sanz Pérez, E. y Pellicer Corellano, F. (1994). El periglaciarismo de la Sierra de Cebollera (Soria-La Rioja). *Cuaternario de Geomorfología*, 8(1-2): 123-138.

Sanz Pérez, E. (2001). *Las montañas de Urbión, Cebollera y Cabrejas: Geomorfología y Patrimonio geológico.* Excma. Diputación Provincial de Soria. Colección Temas Sorianos nº 43, 243 pp, Soria.

Schumm, J.A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands, at Perth Amboy, New Jersey. *Geol. Soc. Amer. Bull.,* 67: 597-645.

Selby M.J. (1993). *Hillslope materials and processes*. Oxford University Press. 451 pp.

Skempton, A.W. y De Lory, F.A. (1957). Stability of natural slopes in London Clay. *Proceedings 4 th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2: 378-381, London.

Sobrón García, I. y Ortiz Alejos, F. (1989). Aspectos de la colonización vegetal en un área de montaña submediterránea: el valle del Jubera. *Cuadernos de Investigación Geográfica*. 15 (1-2): 99-108.

Swank, W.T., Douglass J.E. y Cunningham, G.B. (1982). Changes in water yield and storm hydrographs following commercial clearcutting on a southern Appalachian catchment, En: *Hidrological research basins and their use in water resource planning. Proceedings of the international symposium,* Vol. 2, pp. 583-594, National Hydrologic Service. Berne.

Swank, W.T. (1988). Stream chemistry responses to disturbances. En: Forest hydrology and ecology at Coweeta (Swank, W.T., Crossley, D.A., Jr., Eds.). *Ecological Studies,* 66: 339-357, New York.

Swanson, F. y Dyrness, C.T. (1975). Impact or clear cutting and road construction on soil erosion by landslides in the western Cascade Range, Oregon. *Geol.*, 3(7): 393-396.

Swift, L.W., Jr. (1984). Soil losses from roadbed and cut and fill slopes in the southern Appalachian Mountains. *Southern Journal of Applied Forestry,* 8(4): 209-216.

Swift, L.W., Jr. (1985). Forest road design to minimize erosion in the southern Appalachian. En: *Proceedings, forestry and water quality: a mid-South symposium* (Blackmon, B.G., Ed.). University of Arkansas, Department of Forest Resources, pp. 141-151.

Swift, L.W., Jr. (1986). Filter strip widths for forest roads in the southern Appalachians. *Southern Journal of Applied Forestry,* 10(1): 27-34.

Swift, L.W., Jr. (1988). Forest access roads: design, maintenance and soil loss. En: Forest hydrology and ecology at Coweeta (Swank, W.T., Crossley, D.A., Jr. Eds.). *Ecological Studies,* 66: 313-324, New York.

Swift, L.W. Jr. y Burns, R.G. (1999). The three Rs of roads: redesign, reconstruction and restoration. *Forest Engineering, Water and Soils,* 40-44.

Tague, C. y Band, L. (2001). Simulating the impact of road construction and forest harvesting on hydrologic response. *Earth Surface Processes and Landforms,* 16: 135-151.

Thomas, R.B. y Megahan, W.F. (1998). Peak flow responses to clear-cutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon: a second option. *Water Resources Research*, 34 (12): 3393-3403.

Tischer, G. (1966). *El delta weáldico de las Montañas Ibéricas occidentales y sus enlaces tectónicos. Notas y Comunicaciones*. I.G.M.E., 81: 53-78, Madrid.

Tolosana, E. (1993). Impactos ambientales de las vías de aprovechamiento forestal. En: *Montes*, 34: 48-54.

Tsarapas, I., Rahardjo, H., Toll, D.G. y Leong, E.C. (2002). Controlling parameters for rainfall-induced landslides. *Geomorphology*, 29: 1-27.

Tsurimi, E. (1973). Estimation of the probability of slope disasters along national highways. *Geographical Survey Institute*. Bulletin, 19 (1): 81-88.

U.S.D.A. F.S. (1999). *Roads analysis: informing decisions about managing the national forest transportation system*, Misc. Rep. FS-643, 222 pp., Washington, DC.

U.S.D.A. F.S. (2001). *Forest Roads: A Synthesis of Scientific Information*. (Guzinski, H., Furniss, M.J., Ziemer, R.R y Brookes, M.H. Editors). USDA FS, Pacific Northwest Research Station. General Technical Report PNW-GTR-509, 103 pp., Portland, Oregon.

Valentin, CH. y Bresson, L.M. (1992): Morphology, genesis y classification of surface crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma,* 55: 225-245

Valdiya, K.S. (1988). *Environmental Geology: The Indian Context*. Tata MacGray Hill Publ. Co., New Delhi.

Van Asch, T.W.J. y Buma, J,T. (1997). Modelling groundwater fluctuations and the frecuency of movements of a landslide in the Terres Noires Region of Barcelonnette (France). *Earth, Surface Processes and Landforms*, 22 (2): 131-141.

Van Lear, D.H., Taylor, G.B. y Hansen, W.F. (1995). *Sedimentation in the Chatooga River watershed.* Tech. Pap. 19. Clemson, SC: Clemson University, Department of Forest Resources. 61 pp.

Van Westen, C.J. (1993). *Application of Geographic Information System to landslide hazard zonation.* ITC-Publication Nº 15, ITC, Enschede, 245 pp.

Van Westen, C.J. (1994). GIS in landslide hazard zonation: a review with examples from the Andes of Colombia. En: *Mountain Environment and Geographic System* (Price M., Heywood D.I., Eds.). Taylor and Francis: London; 135-165.

Van Westen, C.J. y Terlien, M.J.T. (1996). An approach towards deterministic landslide hazard analysis in GIS. A case study from Manizales (Colombia). *Earth, Surface Processes and Landforms*, 21 (9): 853-868.

Varnes, D.J. (1984). *Landslide hazard zonation, a review of principles and practice*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris.

Walsh, R.P.D., Coelho, C., Elmes, A., Ferreira, A.J.D., Goncaelves, A.J.B., Shakesby, R.A., Ternan, J.L., y Williams, A.G. (1998). Rainfall simulation plot experiments as a tool in overland flow an soil erosion assessment, North-Central Portugal. *Geoökodynamik,* 19 (3/4): 139-152.

Wemple, B.C., 1994. *Hidrological integration of forest roads with stream networks in two basins, western Cascades, Oregon*. M.S. thesis. Oregon State University. 88 pp Corvallis, OR,

Wemple, B.C., Jones, J.A., Grant, G.E., Selker, J.S., 1996. Runoff generation mechanisms in a steep, forested catchment: controls on flow contributions to a road network (Abstract). *EOS, Transactions, American Geophisical Union*. 77(46):F188.

Wemple, B.C., Swanson, F.J. y Jones, J.A. (2001). Forest roads and Geomorphic process interactions, Cascade Range, Oregon. *Earth Surfaces Processes and Landforms*, 26(3): 191-204.

Zhang, W. y Cundy, T.W. (1987). Test of a surface runoff and soil erosion model for forest road surfaces. *Erosion and sedimentation in the Pacific Rim. Proceedings of the Corvallis Symposium. IAHS* Publ., pp. 263-264.

Zhou, C.H., Lee, C.F., Li, J. y Xu, Z.W. (2002). On the spatial relationship between landslides and causative factors on Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology,* 43: 197-207.

Ziegler, A.D. y Giambelluca, T.W. (1997). Importance of rural roads as source areas for runoff in mountainous areas of northern Thailand. *Journal of Hydrology*, 196(1-4): 204-229.

Ziegler, A.D., Sutherland, R.A. y Giambelluca, T.W. (2001). Interstorm surface preparation and sediment detachment by vehicle traffic on unpaved mountain roads. *Earth Surface Processes and Landforms.* 26(3): 235-250.

Ziemer, R.R. (1981). Storm flow response to road building and partial cutting in small streams of northern California. *Water Resources Research*, 17(4): 907-917.

Ziemer, R.R. (1997). Temporal and spatial scales. En: *Watersheds restoration, principles and practices* (Williams, J.E., Dombeck, M.P., y Wood, C.A., Eds.). American Fisheries Society, pp. 80-95, Bethesda.

Ziemer, R.R. (1998). Flooding and stormflows. En: *Proceedings of the conference on coastal watersheds: the Caspar Creek story* (Ziemer, R.R., Coord.). Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-168. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station, pp.15-24. Albany.

Bibliografía complementaria

Se incluye una relación de citas que, aunque no han sido incluidas en el texto, se han consultado para conocer diferentes aspectos de carácter general de los procesos de erosión detectados en pistas forestales y para desarrollar algunos de los métodos utilizados en el trabajo.

Ackermann, F. (2002). Vista retrospectiva sobre el progreso de la fotogrametría en las últimas décadas. *Mapping,* 76.

Alonso Pérez de Agreda, E. (1986). a) Movimientos del terreno. Roturas en suelos. Casos reales.- b) Influencia del agua en la estabilidad de taludes. Roturas en rocas. Casos reales: *Riesgos naturales en Ingeniería civil.* Universitat Politécnica de Catalunya, Barcelona.

Alonso Pérez de Agreda, E. (1989). Análisis de la estabilidad de taludes. Casos simples. *Estabilidad de taludes y laderas naturales*. Sociedad Española de Geomorfología, Monografías nº 3, pp. 97-118.

Álvarez Seco, A. y Barranco Sanz, L. (2002). Los Sistemas de Información Geográfica en Protección Civil. En: *Los Sistemas de Información Geográfica en la gestión de los riesgos geológicos y el medio ambiente* (Laín Huerta, L. Edr.). Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Medio Ambiente. Riesgos Geológicos, nº 3, Ministerio de Ciencia y Tecnología.

Amaranthus, M.P., Rice, R.M., Barr, N.R. y Ziemer, R.R. (1995). Logging and forest roads related to increased debris slides in southwestern Oregon. *Journal of Forestry.* 83(4): 229-233.

Baroni, C., Bruschi, G. y Ribolini, A. (2000). Human-induced hazardous debris flows in Carrara Marble Basins (Tuscany, Italy). *Earth, Surface, Processes and Landforms*, 25 (1).

Barredo, J.I. (1996). *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio,* Editorial Ra-ma, Madrid.

Bishop, A.W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique,* 5: 7-17.

Bosque, J. (1992). *Sistemas de información geográfica*. Editorial Rialp. Col.: Monografías y tratados GER, Madrid.

Bosque, J., Escobar, García y Salado (1994). *Sistemas de Información geográfica. Prácticas con PC ARC/INFO e IDRISI,* Editorial Ra-ma, 504 pág., Madrid.

Bosque, J. y Moreno Jiménez, A. (1994). *Prácticas de análisis exploratorio y multivariante de datos.* Oikos-tau. Barcelona.

Calvo, M. (1993). *Sistemas de Información Geográfica Digitales*. Sistemas Geomáticos, IVAP, Oñati.

Calvo Cases, A. (1988). Geomorfología de laderas. En: *Perspectivas en Geomorfología*. (Gutierrez, M. y Peña, J.L., Edrs.). Sociedad Española de Geomorfología, Monografías nº. 2, pp.135-143, Zaragoza.

Cebrián, J.A. (1992). *Información geográfica y sistemas de información geográfica (SIGs),* Serv. Public. Univ. de Cantabria, Santander.

Cendrero, A. (1987). Riesgos geológicos, ordenación del territorio y protección del medio ambiente. En: *Riesgos geológicos* (Ayala, F.J., Durán, J.J. y Peinado, T., Edrs.), IGME, pp. 327-333, Madrid.

Chomitz, K.M. y Gray, D.A. (1996). Roads, land use, and deforestation: a spatial model applied to Belize. *The World Bank Economic Review*, 10(3): 487-512.

Clereci, A., Perego, S., Tellini, C. y Vescovi, P. (2002). A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. Geomorphology, 48: 349-364.

Cooke, R.U. y Doomkamp, J.C. (1997). *Geomorphology in environmental management. A new introduction.* Oxford University Press.

Comas, D., y Ruiz, E. (1993). *Fundamentos de los sistemas de información geográfica.* Ariel, Ariel Geografía, Barcelona.

Corominas, J. (1988). Avances recientes en el reconocimiento, análisis y control de laderas inestables. En: *Perspectivas en Geomorfología*. (Gutiérrez, M. y Peña, J.L., Edrs.) Sociedad Española de Geomorfología. Monografía nº 2, pp. 144-154, Zaragoza.

Corominas, J. (1989). Clasificación y reconocimiento de los movimientos de ladera. En: *Estabilidad de taludes y laderas naturales* (Corominas, J., Ed.). Sociedad Española de Geomorfología, Monografía nº 3, pp. 1-30., Zaragoza.

Corominas, J. (1989): Litologías inestables. En: *Estabilidad de taludes y laderas naturales*, (Corominas, J., Ed.). Sociedad Española de Geomorfología, Monografía nº 3, pp. 81-96, Zaragoza.

Crozier, M.J. (1973). Techniques for the morphometric analysis of landslips. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 17 (1):78-101.

Detwyler, T.R. (1971). *Man´s impact on environment*. McGraw Hill, 731 pp., New York.

Díez Herrero, A. (2002). Aplicaciones de los sistemas de Información Geográfica al análisis del riesgo de inundaciones fluviales. En: *Los Sistemas de Información Geográfica en la gestión de los riesgos geológicos y el medio ambiente* (Lain Huerta, L. Ed.). Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Medio Ambiente. Riesgos Geológicos. nº 3. Ministerio de Ciencia y Tecnología.

Dikau, R. (1999). The recognition of landslides. En: *Floods and Landslides: Integrated Risk Assessment* (Casale, R. y Margottini, C., Eds). Verlag Springer, 39-44 pp.

Donald, J.A., Wemple, B.C., Grant, G.E. y Swanson, F.J. (1996). Interaction of logging roads with hillslope and channel processes during the February 1996 flood in western Oregon. En: *EOS Transactions, American Geophysical Union*, 77(46), American Geophysical Union, San Francisco. Washington, DC.

Douglass, J.E. y Swift, I.W. Jr. (1977). Forest Service studies of soil and nutrient losses caused by roads, logging, mechanical site preparation, and prescribed burning in Southeast. En: *Watershed research in eastern North America: a workshop to compare results* (Correll, D.L., Ed.). Environmental Studies, pp. 489-502.

Echevarría Arnedo, M.T. (1997). Cartografía geomorfológica temática y aplicada. En: *Cartografía geomorfológica básica y aplicada (Peña, J.L., Edr.)*. Geoforma Ediciones, pp. 147-179, Logroño.

Einstein, H.H. (1988). Landslide risk assessment procedure. En: *Landslides, Proceedings of 5th International Symposium on Landslides* (Bonnard, C., Ed.), Lausanne 2, pp. 1075-1090.

Estrela, T. (1994). Los SIG en Hidrología. En: *Curso sobre utilización de los Sistemas de Información Geográfica en Hidrología* (Estrela, T. y Quintas, L., Eds.), CEDEX, MOPTMA, Madrid.

Estrela, T. y Quintas, L. (1996). El modelo de flujo bidimensional GISPLANA. *Ingeniería Civil,* 104: 13-21.

Farhan, Y. (1999). Landslide hazards and highway engineering in Central and Northern Jordan. In: *Landslides* (Griffiths, Stokes y Thomas, Eds.). Balkema, 37-45 pp, Rotterdam.

Felicísimo, A.M. (1994): *Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales,* Pentalfa, 222 pag., Oviedo.

Fernández Cañadas, M., (1977). *El paisaje en la planificación física. Aproximación sistemática a su valoración.* Tesis doctoral, ETSI Montes. Universidad Politécnica, Madrid.

Fortaleza del Rey, M. (1981). *Caracterización agroclimática de la provincia de La Rioja.* M.A.P.A., Madrid.

Furniss, M.J., Love, M.A. y Flanagan, S.A. (1997): Diversion potential at road-stream crossing. *Water/Road Interaction Tech. Ser.9777-1814-sdtdc*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Technology and Development Program, 12pp., San Dimas, CA

Gallart, F. y Llorens, P. (1994). Papel de los cultivos de montaña y su abandono en la economía del agua. En: *Efectos geomorfológicos del abandono de tierras* (García Ruiz, J.M. y Lasanta T., Eds.). Sociedad Española de Geomorfología, Instituto Pirenaico de Ecología, C.S.I.C., e Institución Fernando el Católico, 43-55 pp., Zaragoza.

Gallart, F. y Llorens, P. (1996). Los efectos hidrológicos de la recuperación del bosque en áreas de montaña. En: *Erosión y recuperación en áreas marginales* (Lasanta T. y García Ruiz, J.M., Eds.). Instituto de Estudios Riojanos. Sociedad Española de Geomorfología, 73-78 pp., Logroño.

García Codrón, J.C. (1984). Dinámica de vertientes en Cantabria oriental ¿Catástrofes naturales o procesos antrópicos?. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 10 (1-2): 65-74

Gerrard, J. y Gadner, R. (2002). Relationships between landsliding and land use in Likhu Khola drainage basin, Middle Hills, Nepal. *Mountain Research and Development.* 22 (1): 48-55.

García Ruiz, J.M. (1985). Movimientos en masa en los conglomerados del contacto depresión del Ebro Sistema Ibérico en La Rioja. En: *Actas del I Coloquio sobre geografía de La Rioja.* Instituto de Estudios Riojanos, pp. 69-79, Logroño.

García Ruiz, J.M., (1990a). La montaña: una perspectiva geoecológica. En: *Geoecocología de áreas de montaña* (García Ruiz, J.M., Ed.). Geoforma Ediciones, pp. 15-25, Logroño.

García Ruiz, J.M. (1990b). El viejo dilema: estabilidad e inestabilidad de los ecosistemas de montaña (García Ruiz, J.M., Ed.). En: *Geoecología de las áreas de montaña*. Geoforma Ediciones, pp. 316-334, Logroño.

Gobierno de La Rioja (1989). *Plan especial de protección del Medio Ambiente natural de La Rioja*. Consejería de Obras Públicas y Urbanismo, 2 vol., Logroño.

.- *Plan de Ordenación de los Recursos Naturales de la Sierra de Cebollera*. Decreto 65/1994, de 17 de noviembre. BOR 1,12, 1994.

.- *Decreto 29/1994, de 12 de mayo del 1994 por el que se regula la circulación y práctica de deportes de vehículos a motor, en montes gestionados por la Comunidad Autónoma de La Rioja*. BOR de 24 de mayo del 1994.

.- *Ley 2/1995 de 10 de febrero, de Protección y Desarrollo del Patrimonio Forestal de La Rioja*. BOR de 21 de febrero de 1995.

Gómez, H., Bradshaw, R.P. y Mather, P.M. (2000). Monitoring the distribution of shallow landslide-prone areas using remote sensing, DTM and GIS: A case study from the tropical Andes of Venezuela. En: *Remote sensing in the 21 st Century: Economic and Environmental Applications* (Casanova, Ed.). Balkema, pp. 395-402, Rotterdam.

Gray, D.H. y Brenner, R.P. (1970). The hydrology and stability of cutover slopes. *Proceedings of the Conference of Interdisciplinary Aspects of Watersheds Management, American Society of Civil Engineers*, pp. 295-326.

Haigh, M.J. (1978). Evolution of slopes on artificial landforms. Research Paper, 183. Department of Geography. University of Chicago.

Heinrich, R. (1984). Estabilización de terraplenes de carreteras mediante trabajos biológicos y de Ingeniería. En: *La explotación maderera de bosques de montaña*. III Curso de Capacitación FAO/Austria sobre Carreteras Forestales y Sistemas de Aprovechamiento (Ossias y Ort Austria, 1981) FAO, pp.81-92, Roma.

Hernández Navarro, S. (1997). Sistemas de información geográfica y caminos forestales. *Ecosistemas*, 22, pp. 96.

Hicks, B.A. (1982). *Geology, geomorphology and dynamics of mass movement in parts of the Middle Santiam River drainage, western Cascades, Oregon*. M.S. thesis. Oregon State University, pp. 169, Corvallis.

Hornbeck, J.W. y Reinhart, K.G. (1964). Water quality and soil erosion as affected by logging in steep terrain. *Journal of Soil and Water Conservation*, 19(1): 23-27.

Krogstad, F. (2001). Incorporating landslide probability into operations planning. International mountain logging and 11th Pacific Northwest Skyline Symposium.71-77.

Lasanta Martínez, T. y Errea Abad, M.P. (2001*). Despoblación y marginación en la Sierra riojana*. Ciencias Sociales 9. Instituto de Estudios Riojanos. Logroño.

López Bermúdez, F. (1984). Geomorfología y medio ambiente. En: *Geografía y medio ambiente*. Monografías de la Dirección General de Medio Ambiente, M.O.P.U., pp. 71-110, Madrid.

López Cadenas, F, y Blanco Criado, M. (1978). *Hidrología forestal.* Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, 2 vol., Madrid.

Lorente, A., García-Ruiz, J.M., Beguería, S. y Arnáez, J. (2002). Factors explaining the spatial distribution of hillslope debris flows: a case study in the flysch sector of the Central Spanish Pyrenees. *Mountain Research and Development*, 22 (1): 32-39.

Malet, J.P., Maquaire, O. y Calais, E. (2002). The use of Global Positioning System techniques for the continous monitoring of landslides: application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Geomorphology*, 43: 33-54.

Martínez-Alegría, R., Lanaja, J.M., Ordóñez, C, y Taboada, J. (1998). Characterization of unstable areas in the confluence of Pisuerga and Duero Rivers. *International Conference on GIS for Earth Science Applications*, pp.135-142, Ljubliana.

Martínez Ramos, E. (1984). Aspectos teóricos del Análisis de Cluster y Aplicación a la caracterización del potencial electoral de un partido. En: *Introducción a las técnicas de análisis multivariables aplicadas a las Ciencias Sociales*. (Sanchez Carrión, J.J. Ed.), 165-208, Madrid.

Mater, C.M. (1997). Consumer trends, market opportunities, and new approaches to sustainable development of special forest products. En: *Special forest products: biodiversity meets the marketplace* (Vance, N.C. y Thomas, J. Eds.). Gen. Tech. Rep. GTR-WO63. US. Department of Agriculture, Forest Service, pp. 8-25. Washington, DC.

McCashion, J.D. y Rice, M.R. (1983). Erosion on logging roads in northwestern California. How much in avoidable?. *J. Forestry,* 81 (1): 23-26.

Mena Barrios, J. (1997). *Cartografía digital*. Editorial Ra-ma. Madrid.

Mensua, S. y García Ruiz, J.M., (1976): *Mapa de utilización del suelo de la provincia de Logroño*. Instituto de Estudios Riojanos, 8 pp. + mapa, Logroño.

Millington, R.J. y Quirk, J.P. (1959). Permeability of porous media. *Nature,* 183: 387-388.

Moldes, F.J. (1995). *Tecnologías de los Sistemas de Información Geográfica,* Editorial Ra-ma, Madrid.

Monzón de Cáceres, A. (1990). Impactos ambientales de carreteras. *Carreteras*, 47. Madrid.

Monzón de Cáceres, A., Gomar, C. y Rey, E. (1992). Método de ponderación de la traza para la evaluación de impactos ambientales de carreteras. *Estudios Geográficos*. 209: 609-636.

Mosley, M.P. (1980). The impact of forest road erosion in the Dart Valley, Nelson. *New Zealand Journal of Forestry*, 25(2): 184-198.

Mulas de la Peña, J., Martínez, M., Rodríguez, J., Rodríguez-Ortiz y Servigis, J.M. (2002). Utilización de un SIG en los estudios geotécnicos para la determinación de los asentamientos por descenso del nivel freático. Aplicación en el área metropolitana de Murcia. En: *Los Sistemas de Información Geográfica en la gestión de los riesgos geológicos y el medio ambiente* (Lain Huerta, L., Ed.). Instituto Geológico y Minero de

España. Serie: Medio Ambiente. Riesgos Geológicos. nº 3. Ministerio de Ciencia y Tecnología, Madrid

Ortigosa Izquierdo, L. (1989). Aportación al desarrollo diferencial de las repoblaciones forestales en relación con factores topográficos y geomorfológicos (La Rioja). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 15 (1-2): 55-65.

Paolini, L., Sobrino, J.A. y Jiménez-Muñoz, J.C. (2002). Detección de deslizamientos de ladera mediante imágenes Landsat TM: el impacto de estos disturbios sobre los bosques subtropicales del noroeste de Argentina. *Revista de teledetección*, 18:21-27.

Parsons, A.J. y Gadian, A.M. (2000). Uncertainty in modelling the detachment of soil by rainfall. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25: 723-728.

Peña Monné J.L. (Ed.) (1997). *Cartografía geomorfológica básica y aplicada*. Geoforma Ediciones, 227 pp., Logroño.

Robinson, V.L. y Fisher, E.L., (1982). High-lead yarding costs in the southern Appalachians. *Southern Journal of Applied Forestry*, 6(3): 172-176.

Ruiz, J.M. (1994). Modelización fisiográfica y climática con los SIG. En: *Curso sobre utilización de los Sistemas de Información Geográfica en Hidrología* (Estrela, T. y Quintas, L., Eds.), CEDEX, MOPTMA, Madrid.

Schenk, T. (2002). *Fotogrametría digital. Geomática*. Vol. 1. Generalitat de Catalunya. Institut Cartogràfic de Catalunya.

Schuster, R.L. y Krizek, J., (Eds) (1978). *Landslides: analysis and control*. Transportation Research Board. Washington, DC.

Sessions, J., Balcom, J.C. y Boston, K. (1987). Road location and construction practices: effects on landslides frequency and size in the Oregon Coast Range. *Western Journal of Applied Forestry,* 2(4): 119-124.

Smith K. (1992). *Environmental hazards. Assessing risk and reducing disaster*. Routledge. London:

Sobrón García, I. (1987). Aproximación al estudio del escalonamiento vegetal en las montañas de La Rioja. *Estudios Geográficos*, 189: 574-594, Logroño.

Swanson F.J., Swanson, M.M. y Woods, C. (1981). Analysis of debris-avalanche erosion in steep forest lands: an example from Mapleton, Oregon, USA. En: *Erosion and sediment*

transport in Pacific Rim steeplands: Symposium. (Davies, T.R.H., Pearce, A.J., Eds.). IAHS-AISH, Pub. 132, pp. 67-75, Washington, DC.

Swanson F.J., Clayton, J.L., Megahan, W.F., Bush, G. (1989). Erosional processes and long-term site productivity. En: *Maintaining the long-term productivity of Pacific Northwest ecosystems* (Perry, D.A., Meurisse, R. Thomas, B., Eds.). Timber Press, pp. 67-81, Portland, OR.

Trimble, G.R. y Sartz, R.S. (1957). How far from a stream should a logging road be located? *Journal of forestry*, 55(5): 339-342.

VV.AA. (1999). *Riesgos catastróficos y ordenación del territorio en Andalucía*. Consejería de Obras Públicas y Transportes, Dirección General de Ordenación del Territorio y Urbanismo. Sevilla.

VV.AA. (2001). *Mitigación de Desastres Naturales en Centroamérica: I Análisis y Gestión de Riesgos.* Ministerio de Asuntos Exteriores, Ministerio de Ciencia y Tecnología, Agencia Española de Cooperación Internacional, Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid.

Wu, T.H., Mckinnel, W.P. y Swanston, D.N. (1979). Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. *Canadian Geotechnical Journal*, 16: 1933.

APÉNDICES

APÉNDICES:

Apéndice 1. Ficha de campo de las pruebas de simulación de lluvia. 321
Apéndice 2 a. Características generales de taludes y microparcelas en las simulaciones de lluvia. 322
Apéndice 2 b. Características generales de taludes y microparcelas en las simulaciones de lluvia. 323
Apéndice 3 a. Respuesta hidrológica de las simulaciones de lluvia. 324
Apéndice 3 b. Respuesta hidrológica de las simulaciones de lluvia. 325
Apéndice 4. Respuesta erosiva de las simulaciones de lluvia. 326
Apéndice 5 a. Algunos ejemplos de respuesta hidrológica en simulación de lluvia. 327
Apéndice 5 b. Algunos ejemplos de respuesta erosiva en simulación de lluvia. 330
Apéndice 6. Características generales de los movimientos en masa. 333
Apéndice 7a. Movimientos en masa y factores ambientales y topográficos. 337
Apéndice 7b. Movimientos en masa y factores ambientales y topográficos. 341
Apéndice 8. Representación gráfica de algunos perfiles de movimientos en masa según grupos constituidos por el análisis cluster. 345

APÉNDICE 1

FICHA DE CAMPO SIMULACION DE LLUVIA

DATOS GENERALES	
N. Simulación	
Pista forestal	
Fecha:	
Hora:	
Hoja MTN	

Litología	
Altitud	
Exposición	
TALUD	
TALUD SUPERIOR	
TALUD INFERIOR	
Parte alta	
Parte media	
Parte baja	
Rocosidad (%)	
Pedregosidad (%)	
Cub. vegetal (%)	
Arbolado	
Matorral	
Herbáceas	
Liquenes	
Hojarasca	
Alt./Lg. del talud	
Pendiente talud	
Muestra de suelo	
CALZADA	
Sector interior	
Sector central	
Sector exterior	
Pendiente	
Cub. vegetal %	
Muestra de suelo	
Observaciones	

MICROPARCELA	
Pendiente:	
Rocosidad (%):	
Pedregosidad (%):	
Tamaño piedras:	
Vegetación (%):	
Matorral:	
Herbácea:	
Musg./liq.:	
Otros:	
Microrelieve:	
Grietas	
Costra	
Rills	
Depresiones	
Otros	

INTENSIDAD LLUVIA

	10 m	20 m	30 m
1 Plv.			
2 Plv.			
3 Plv.			

IP (mm/h)

SIMULACION DE LLUVIA

Bote	Tiem.(")	Agua(ml)	Esc(ml/s)	Sed.(g)	CSS(g/l)	Observ.

DATOS GENERALES DE LA SIMULACIÓN	
Tiempo de precipitac. (sg)	
Total precipitación (ml)	
Inicio de la escorrentía (sg)	
Final escorrentía (sg)	
Tiempo de escorrentía (sg)	
Total escorrentía (ml)	
Escorrentía (ml/s)	
Pico de escorrentía (ml/s)	
Infiltración (ml)	
Coeficiente de escorrentía (%)	
Total de sedimentos (mg)	
Pico de concentración de sedimentos (gr/l)	
Concentración media de sedimen. (gr/l)	
Tasa de erosión (gr/m2/h)	

FRENTE DE HUMECTACION

APÉNDICE 2 A

Características generales de taludes y microparcelas en las simulaciones de lluvia

Simu.	Sector	Altitud	Expos	PT	AT	LT	PtP	PP
T1-1	corte-talud	910	SW	31	4		33	5
T1-2	corte-talud	910	SW	29	6		22	20
T1-3	corte-talud	910	SW	39	2,2		38	5
T1-4	corte-talud	1050	W	37	2,5		37	20
T1-5	corte-talud	1050	W	31	2,5		31	75
T1-6	corte-talud	1200	E	45	3,5		40	20
T1-7	corte-talud	1200	E	31	4		45	5
T1-8	corte-talud	920	N	58	2,5		40	90
T1-9	corte-talud	1140	NW	35	2		26	5
T1-10	corte-talud	1380	NE	30	6,35		28	
T1-11	corte-talud	1375	NE	25	2,6		10	1
T1-12	corte-talud	790	SW	52	6		28	30
T2-1	t. inferior	1050	W	26		4	23	60
T2-2	t. inferior	1050	W	25		2,5	24	30
T2-3	t. inferior	920	N	26		2	18	80
T2-4	t. inferior	920	N	26		2	38	80
T2-5	t. inferior	1140	NW	31		6	28	0
T2-6	t. inferior	720	SW	38		7,8	34	20
C-1	calzada	910					6	5
C-2	calzada	1050	W				6	30
C-3	calzada	1200	SE				4	50
C-4	calzada	1200	E				5	50
C-5	calzada	1200	E				6	10
C-6	calzada	1140	NW				8	1
C-7	calzada	1380	NW				5	1
C-8	calzada	740	W				3	10
C-9	calzada	900	N				4	
C-10	calzada	1300	NW				4	

Altitud (m), **Expos** (Exposición), **PT** (Pendiente del talud en grados), **AT** (altura del talud en metros), **LT** (longitud del talud en metros), **PtP** (pendiente de la parcela en grados), **PP** (pedregosidad en %)

APENDICE 2B

Características generales de taludes y microparcelas en las simulaciones de lluvia

Simul.	VT	Mt	Hb	Hj	Mg	Microtopografía
T1-1	0	0	0	0	0	depresiones
T1-2	40	0	40	0	0	depresiones
T1-3	0	0	0	0	0	rigolas
T1-4	0	0	0	0	0	grietas, rigolas
T1-5	0	0	0	0	0	
T1-6	0	0	0	0	0	depresiones
T1-7	0	0	0	0	0	grietas, depresiones
T1-8	0	0	0	0	0	depresiones
T1-9	1	0	1	0	0	depresiones
T1-10						depresiones
T1-11	15	0	15	0	0	depresiones
T1-12	1	0	0	1	0	
T2-1	5	0	5	0	0	depresiones
T2-2	40	0	40	0	0	depresiones
T2-3	45	0	45	0	0	depresiones, apelm.
T2-4	0	0	0	0	0	depresiones
T2-5	80	0	80	0	0	depresiones
T2-6	70	0	70	0	0	depresiones
C-1	50	0	45	0	5	depresiones
C-2	1	0	1	0	0	
C-3	0	0	0	0	0	apelmazamiento
C-4	0	0	0	0	0	apelmazamiento
C-5	40	0	35	0	5	depresiones
C-6	60	0	60	0	0	apelmazamiento
C-7	30	0	30	0	0	depresiones
C-8	50	0	5	0	45	depresiones
C-9						depresiones
C-10						depresiones

VT (cubrimiento vegetal en %), **Mt** (matorral en %), **Hb** (Herbáceas en %), **Hj** (Hojarasca en %), **Mg** (Musgos y líquenes en %)

APÉNDICE 3 A

Respuesta hidrológica de las simulaciones de lluvia

Simul.	IP (mm/h)	Tp (s)	Ie (s)	Fe (s)	Te (s)	Totp (ml)	Totes (ml)
T1-1	80	1800	18	1845	1827	5566	4807
T1-2	70	1642	274	1740	1466	4421	1161
T1-3	65	1828	88	1882	1794	4580	4478
T1-4	74	1800	192	1850	1658	5134	3257
T1-5	81	1813	444	1813	1369	5654	1045
T1-6	100	1755	62	1852	1790	6783	4982
T1-7	93	1800	58	1845	1787	6478	5020
T1-8	100	1800	192	1852	1660	6957	4248
T1-9	84	1800	215	1920	1705	5806	4771
T1-10	55	1800	90	1872	1782	3838	1746
T1-11	62	1800	355	1870	1515	4606	456
T1-12	74	1810	75	1868	1793	5163	2697
T2-1	74	1800	324	1906	1582	5134	2069
T2-2	93	1799	165	1885	1720	6426	2486
T2-3	68	1800	766	1882	1116	4702	1166
T2-4	68	1830	331	1880	1549	4780	801
T2-5	65	1800	222	1893	1671	4510	1660
T2-6	64	1800	200	1825	1625	4477	1987
C-1	79	1800	659	1904	1245	5470	2363
C-2	89	699	374	780	406	2403	865
C-3	80	1809	316	1893	1577	5787	3588
C-4	88	1785	353	1858	1505	6090	3814
C-5	95	1800	286	1868	1582	6574	2408
C-6	68	1800	356	1950	1594	4750	3014
C-7	89	1810	225	2040	1815	6224	3518
C-8	90	1800	360	1845	1485	6286	2347
C-9	80	1800	241	1845	1604	6334	1332
C-10	64	1770	240	1880	1640	4388	2012

IP (intensidad de la precipitación en mm h^{-1}), **Tp** (tiempo de precipitación en segundos), **Ie** (inicio de la escorrentía en segundos), **Fe** (final de la escorrentía en segundos), **Te** (Tiempo de escorrentía en segundos), **Totp** (Total precipitación en mililitros), **Totes** (total escorrentía en mililitros).

APÉNDICE 3B

Respuesta hidrológica de las simulaciones de lluvia

Simul.	Totinf (ml)	Ce (%)	Esm (ml/s)	DsEsm	Pes (ml/s)	Fh (cm)
T1-1	759	86,3	2,6	0,8	4	2
T1-2	3260	26,2	0,7	0,4	1,2	6
T1-3	102	97,7	2,5	0,7	2,9	4
T1-4	1877	63,4	1,9	0,6	2,2	3
T1-5	4609	18,4	0,7	0,5	1,1	10
T1-6	1801	73,4	2,7	0,9	4,2	2
T1-7	1458	77,4	2,8	0,8	4	2,5
T1-8	2709	61	2,5	0,7	0,5	6
T1-9	1035	82,1	2,8	0,9	3,8	4
T1-10	2092	45,4	0,9	0,4	1,6	5
T1-11	4150	9,9	0,3	0,1	0,3	10
T1-12	2466	52,2	1,5	0,6	2,5	
T2-1	3065	40,3	1,3	0,5	1,6	5
T2-2	3940	38,6	1,4	0,6	1,9	7
T2-3	3536	24,8	1,4	0,5	1,3	7
T2-4	3979	16,7	0,5	0,4	0,5	25
T2-5	2850	36,8	0,9	0,3	1,4	5
T2-6	2490	44,3	1,2	0,5	2,1	2,5
C-1	3107	43,2	1,8	0,7	2,8	12
C-2	1538	36	2,1	1,3	2,7	2,5
C-3	2199	62	2,2	0,7	2,9	6
C-4	2276	62,6	2,5	0,9	3,5	6
C-5	4166	36,6	1,5	0,5	1,8	6
C-6	1736	63,4	1,8	0,6	2,6	3,5
C-7	2706	56,5	1,9	1,2	4,7	3
C-8	3912	37,7	1,5	0,7	3,4	6,3
C-9	5002	21	0,8	0,4	1,6	7
C-10	2376	45,5	1,2	0,5	2,3	3,5

Totinf (Total infiltración en mililitros), **Ce** (Coeficiente de escorrentía en porcentaje), **Esm** (Escorrentía media en ml s^{-1}), **DsEsm** (Desviación estandar de la escorrentía media), **Pes** (Pico de escorrentía en ml s^{-1}), **Fh** (Frente de humectación en cm).

APÉNDICE 4

RESPUESTA EROSIVA DE LAS SIMULACIONES DE LLUVIA

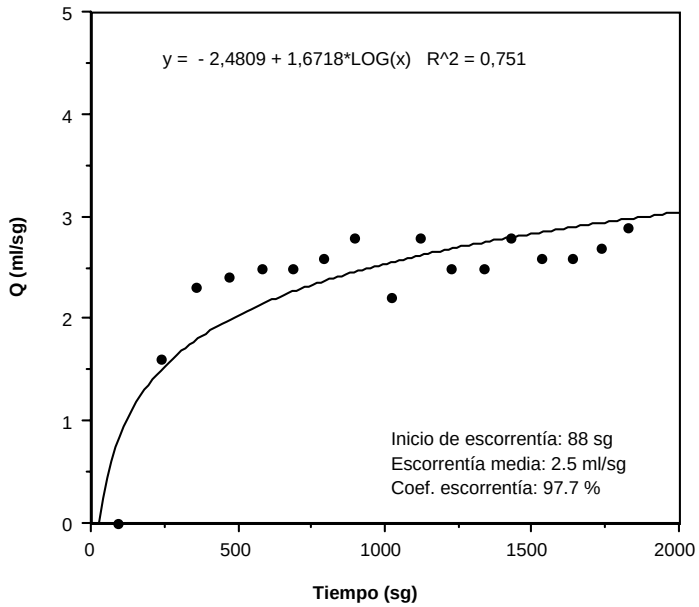
Simul.	Tsed (mg)	Csedm (g/l)	DsCsed	Pcsed (g/l)	Csed1 (g/l)	Csed2 (g/l)	PerTS (g/m2)
T1-1	58394	12,1	4	27,5	27,5	9,1	415,3
T1-2	1867	1,6	0,7	2,8	1,4	1	16,5
T1-3	29792	6,6	3,6	18,5	18,5	4,5	215,8
T1-4	36415	11,1	4,8	17,3	17,3	13,2	285,4
T1-5	2427	2,3	1,8	4,4	4,4	1,1	23
T1-6	37601	7,5	2,1	12,2	8,7	6,3	273
T1-7	75635	15	4,8	31,9	15,7	12	550
T1-8	3909	0,9	0,3	2,1	2,1	0,6	30,6
T1-9	11820	2,4	0,8	3,9	3,3	2	90,1
T1-10	1223	0,7	0,2	1,2	1	0,5	8,9
T1-11	352	0,7	0,3	1	1	0,5	3
T1-12	2308	0,8	0,2	1,5	1,5	0,6	16,7
T2-1	1153	0,5	0,4	1,2	1,2	0,2	9,4
T2-2	832	0,3	0,1	0,4	0,4	0,3	6,2
T2-3	1172	1	0,6	2	2	0,6	13,6
T2-4	1803	2,2	1,3	4	1,6	3,4	15,1
T2-5	1066	0,6	0,1	0,8	0,8	0,4	8,3
T2-6	1305	0,6	0,2	1,3	1,3	0,4	10,4
C-1	2158	0,9	0,2	1,6	1,6	0,4	22,5
C-2	457	0,5	0,2	0,9	0,9	0,3	14,6
C-3	1518	0,4	0,1	0,7	0,6	0,3	12,5
C-4	1785	0,4	0,06	0,6	0,6	0,4	15,2
C-5	1047	0,4	0,06	0,6	0,6	0,3	8,6
C-6	2549	0,8	0,2	1,5	1,4	0,5	20,8
C-7	3182	0,9	1,04	6,8	6,8	0,7	22,8
C-8	946	0,4	0,1	0,7	0,1	0,3	8,2
C-9	859	0,6	0,1	0,8	0,8	0,5	6,9
C-10	1283	0,6	0,05	0,8	0,8	0,6	10,1

Tsed (Total de sedimentos en suspensión en miligramos), **Csedm** (Concentración media de sedimentos en suspensión en g l^{-1}), **DsCsed** (Desviación estandar de la concentración de sedimentos en suspensión), **Pcsed** (Pico de concentración de sedimentos en suspensión en g l^{-1}), **Csed1** (Concentración de sedimentos en suspensión al comienzo de la escorrentía en g l^{-1}), **Csed2** (Concentración de sedimentos en suspensión al finalizar la precipitación en g l^{-1}), **PerTs** (Pérdidas totales de suelo a lo largo de la simulación, g m^{-2} en 30 minutos).

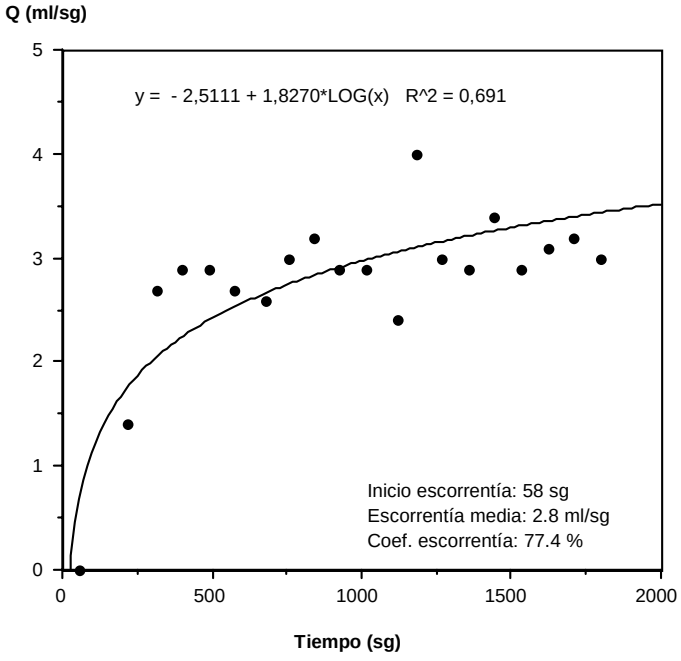
APÉNDICE 5 A

ALGUNOS EJEMPLOS DE RESPUESTA HIDROLÓGICA EN SIMULACIÓN DE LLUVIA
(Se ha mantenido la misma escala en el eje "y" para poder comparar los valores en los tres sectores de la pista: corte-talud, talud superior y calzada)

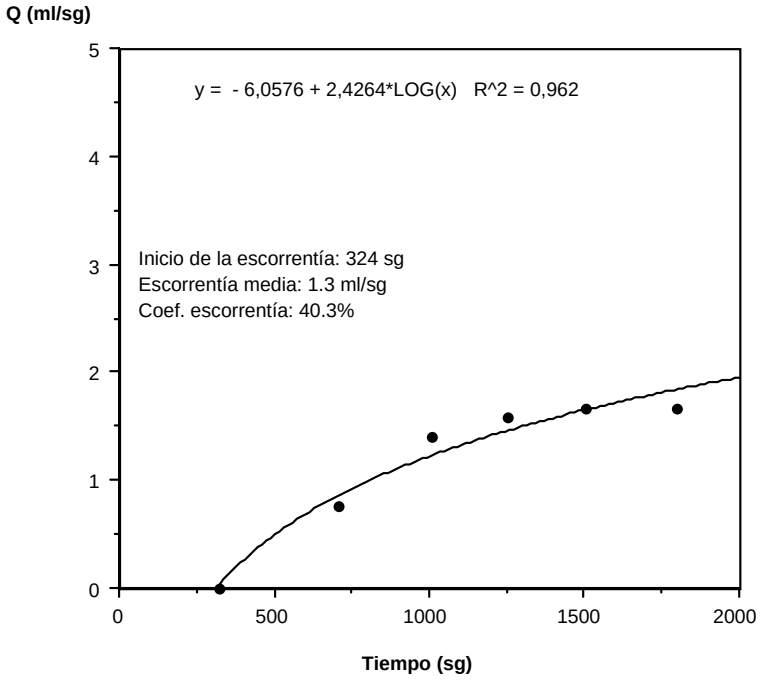
RESPUESTA HIDROLOGICA. Prueba T1-3



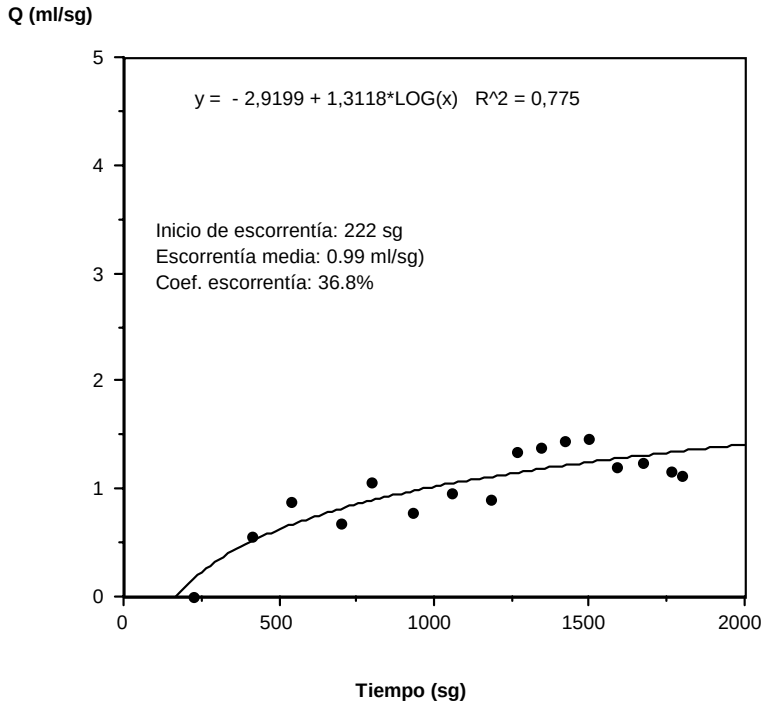
RESPUESTA HIDROLOGICA. Prueba T1-7



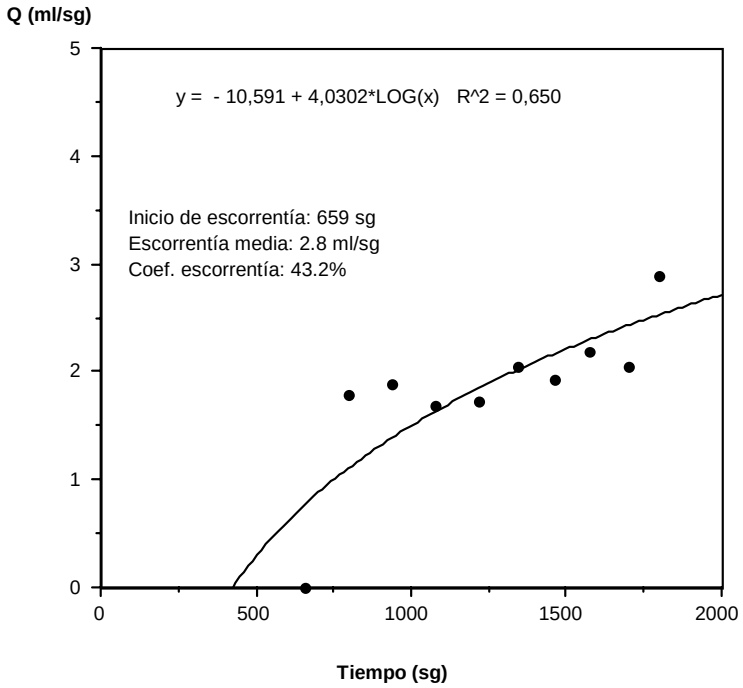
RESPUESTA HIDROLOGICA. Prueba T2-1



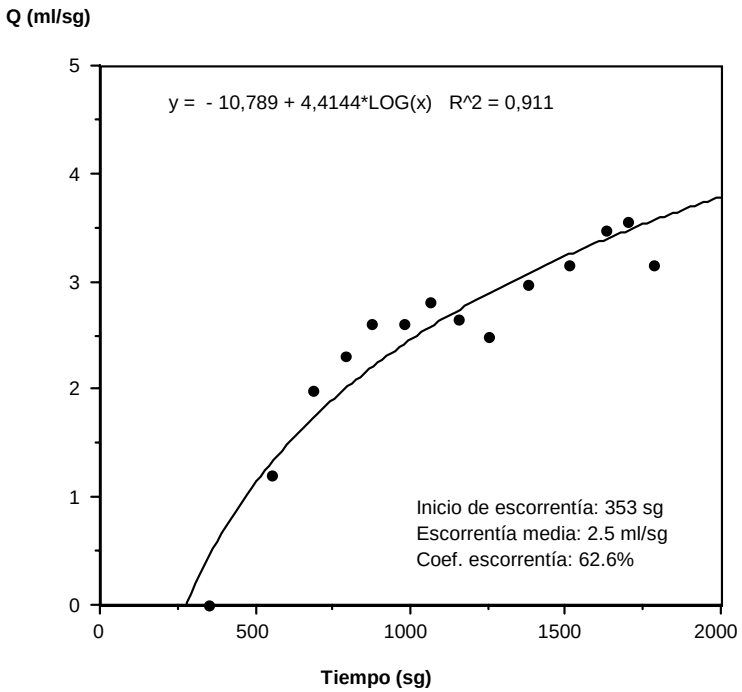
RESPUESTA HIDROLOGICA. Prueba T2-5



RESPUESTA HIDROLOGICA. Prueba C1



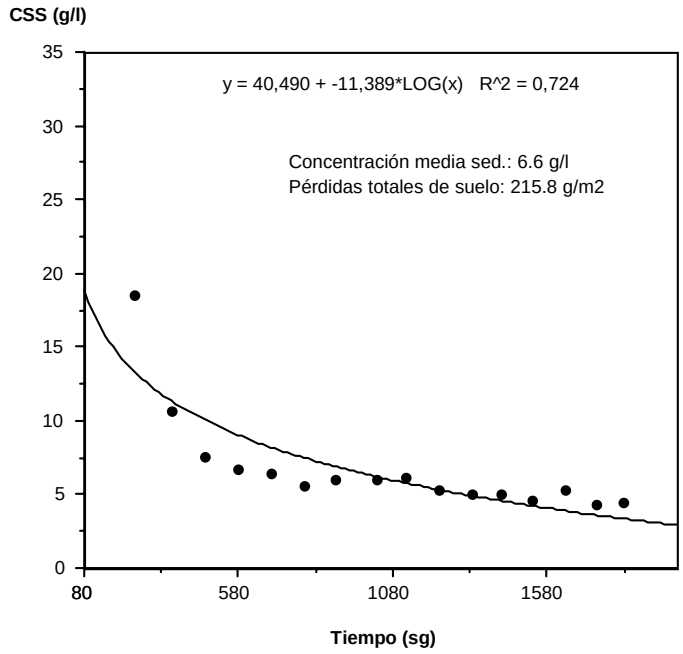
RESPUESTA HIDROLOGICA. Prueba C-4



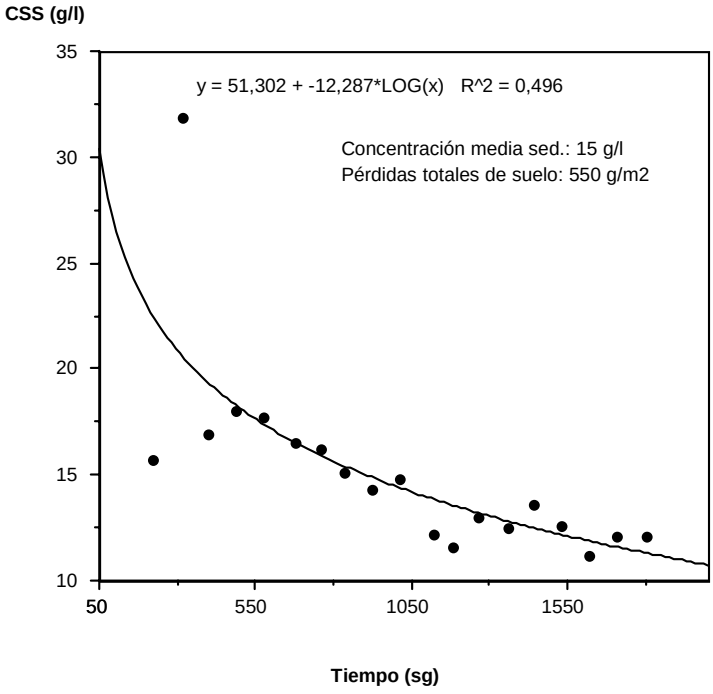
APÉNDICE 5B

ALGUNOS EJEMPLOS DE RESPUESTA EROSIVA EN SIMULACIÓN DE LLUVIA

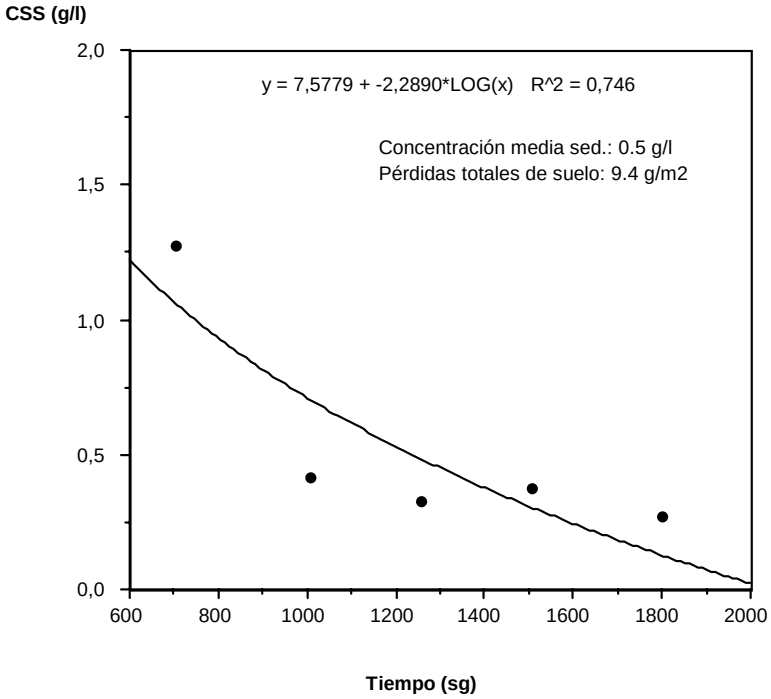
RESPUESTA EROSIVA. Prueba T1-3



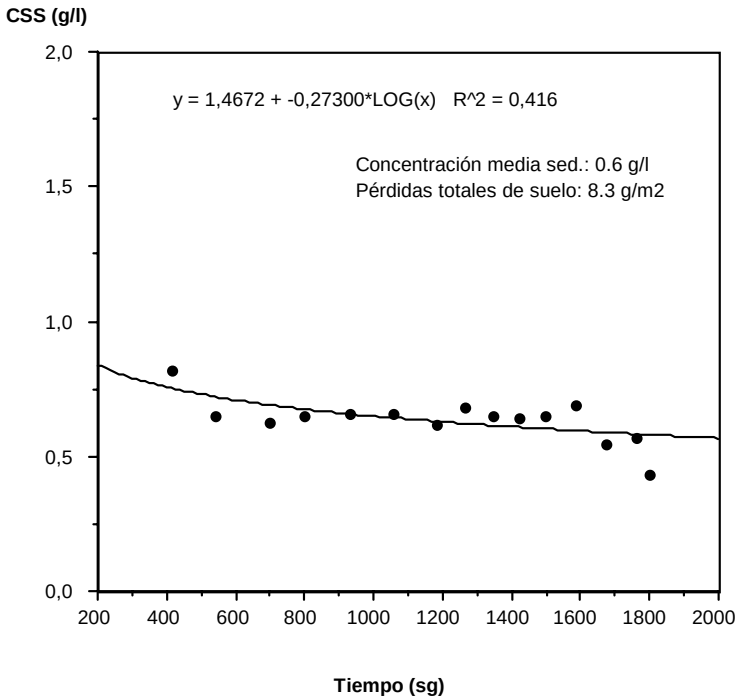
RESPUESTA EROSIVA. Prueba T1-7

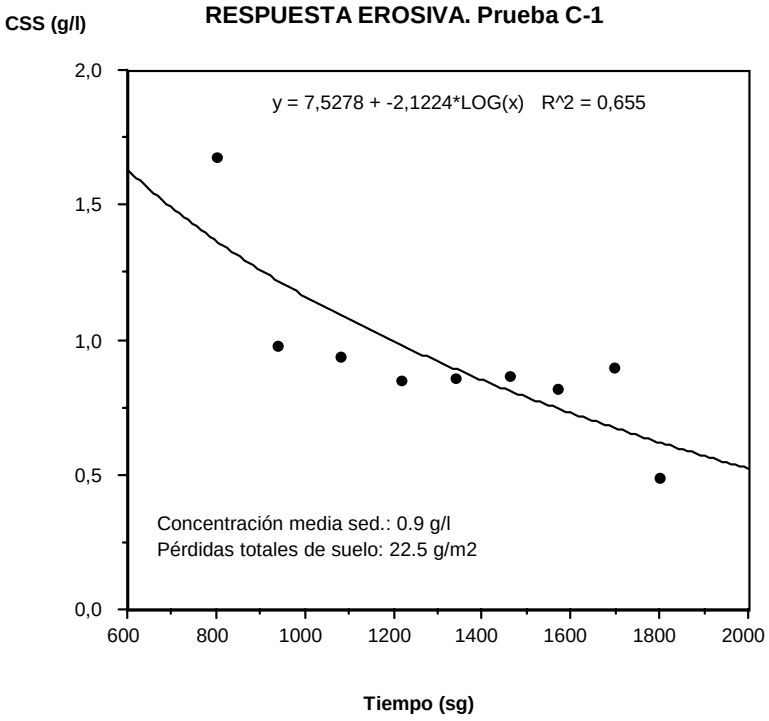


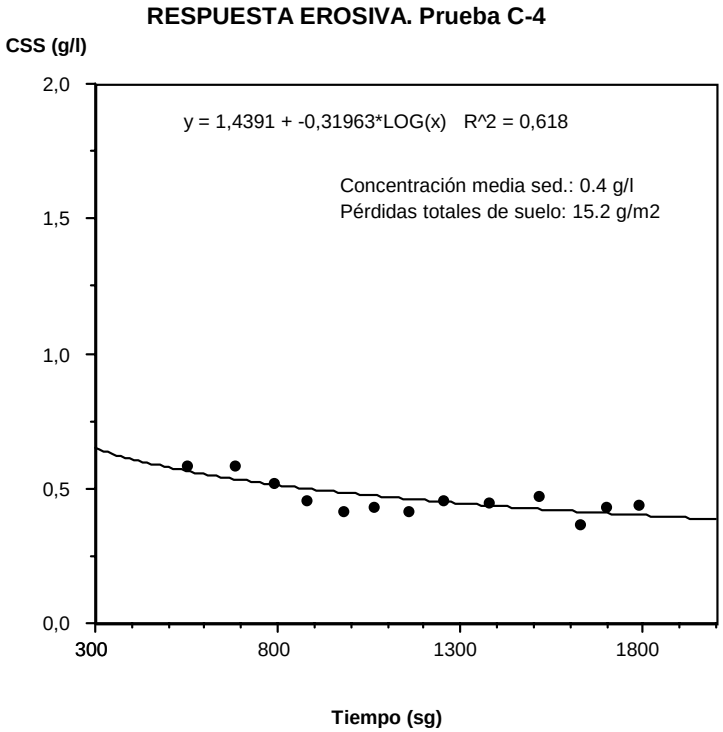
RESPUESTA EROSIVA. Prueba T2-1



RESPUESTA EROSIVA. Simulación T2-5




RESPUESTA EROSIVA. Prueba C-1
CSS (g/l)
y = 7,5278 + -2,1224*LOG(x) R^2 = 0,655
Concentración media sed.: 0.9 g/l
Pérdidas totales de suelo: 22.5 g/m2
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
Tiempo (sg)


RESPUESTA EROSIVA. Prueba C-4
CSS (g/l)
y = 1,4391 + -0,31963*LOG(x) R^2 = 0,618
Concentración media sed.: 0.4 g/l
Pérdidas totales de suelo: 15.2 g/m2
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
300
800
1300
1800
Tiempo (sg)

APÉNDICE 6

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS MOVIMIENTOS EN MASA

nº	pista	sector	longtot (m)	longci (m)	pendci (º)	profmci (m)	anchci (m)	volobs (m3)
1	1	T1	1,9	1,1	46	0,26	2,4	0,32
2	1	T1	2,0	0,9	50	0,38	4,8	0,58
3	1	T2	7,0	4,6	51	0,61	3,5	5,05
4	1	T2	3,8	2,2	44	0,35	2,5	0,83
5	1	T1	3,5	1,9	65	0,38	4,0	1,75
6	1	T1	3,0	2,4	60	0,50	2,1	1,23
7	1	T2	4,9	3,4	54	0,50	9,1	5,73
8	1	T1	3,4	2,2	38	0,35	2,5	1,01
9	1	T2	8,2	2,8	50	0,50	8,7	4,19
10	1	T1	2,2	1,5	46	0,17	2,2	0,21
11	1	T1	1,7	0,9	56	0,20	2,6	0,16
12	1	T1	10,8	5,9	50	0,50	5,3	7,96
13	1	T1		2,3	62	0,64	3,3	1,37
14	1	T1	3,8	1,9	42	0,24	5,2	0,41
15	1	T1	7,9	4,2	52	0,70	3,6	5,24
16	1	T1	2,2	1,1	48	0,25	2,3	0,22
17	1	T1	3,1	1,6	55	0,18	8,5	0,99
18	1	T1	4,9	2,2	20	0,22	5,0	1,11
19	1	T1	3,5	2,7	40	0,34	3,8	1,52
20	1	T1	3,4	1,2	47	0,38	5,6	0,99
21	1	T1	5,1	2,6	60	0,79	2,5	1,90
22	1	T1	6,1	2,5	50	0,41	2,7	1,00
23	1	T1	6,1	3,1	52	0,59	6,0	4,45
24	1	T1	3,5	1,7	50	0,45	2,5	0,67
25	1	T1	4,0	2,1	38	0,20	2,8	0,43
26	1	T1	5,0	2,7	53	0,49	3,6	0,25
27	1	T1	5,3	2,6	63	0,82	2,9	3,42
28	1	T1	6,3	3,1	60	0,75	4,0	3,46
29	1	T1	4,7	2,3	49	0,65	3,6	2,60
30	1	T1	5,6	2,7	55	0,72	6,3	4,88
31	1	T1	5,4	3,0	50	0,56	10,0	7,93
32	1	T2	4,8	2,6	62	0,40	4,0	1,53
33	1	T1	9,1	4,6	60	0,55	4,7	5,46
34	1	T2	4,9	2,3	46	0,45	8,2	3,14
35	1	T1	4,8	2,0	64	0,38	7,5	2,17
36	1	T1	15,4	7,7	40	0,75	11,1	41,96
37	1	T1	5,0	2,5	59	0,55	2,7	1,39
38	2	T1	4,1	2,1	60	0,58	4,4	1,88
39	2	T1	3,6	2,1	60	0,39	2,4	0,75
40	2	T1	3,3	2,0	59	0,58	4,5	2,06
41	2	T2		3,5	38	0,40	5,7	2,28
42	2	T2		6,0	41	0,50	15,0	24,01

nº	pista	sector	longtot (m)	longci (m)	pendci (º)	profmci (m)	anchci (m)	volobs (m3)
43	2	T2	5,0	3,0	37	0,39	2,8	1,51
44	2	T1	10,6	5,5	45	0,44	2,3	0,71
45	2	T1	4,2	3,2	54	0,57	2,3	1,82
46	2	T1	4,0	2,0	80	0,68	2,0	0,80
47	2	T1	4,3	2,3	70	0,73	3,0	0,97
48	2	T1	5,0	2,8	53	0,49	4,0	2,40
49	2	T1	3,5	1,8	48	0,61	2,1	0,83
50	2	T1	7,4	4,2	35	0,84	6,5	11,39
51	2	T1	11,0	5,0	42	0,69	8,0	11,34
52	2	T1	11,3	5,6	36	0,75	7,4	23,32
53	2	T1	4,8	3,0	44	0,52	4,3	3,67
54	2	T1	3,6	1,8	66	0,75	4,0	1,99
55	2	T1	6,1	3,0	50	0,77	4,0	4,48
56	2	T1	5,8	2,3	45	0,38	3,1	1,30
57	2	T1	5,4	3,1	45	0,30	2,2	0,85
58	2	T1	7,0	4,9	46	0,30	2,0	2,01
59	2	T1	8,6	5,0	46	0,23	6,8	0,57
60	2	T1	5,1	3,0	45	0,40	6,6	6,43
61	2	T1	6,0	1,7	80	1,00	6,1	6,40
62	2	T1	5,3	3,3	52	0,84	4,9	7,00
63	2	T1	3,2	1,7	60	0,98	2,3	1,25
64	2	T1	7,0	3,5	64	0,76	3,0	2,41
65	2	T1	8,1	4,1	52	0,80	3,2	5,72
66	2	T2	60,0	15,0	40	1,80	7,5	129,59
67	2	T1	16,1	9,4	45	1,10	7,0	47,07
68	2	T1	27,0	10,3	43	1,49	11,5	216,73
69	2	T1	6,1	2,7	48	0,35	2,0	0,93
70	2	T1	8,6	4,3	50	1,20	3,0	7,03
71	2	T1	10,3	5,2	55	1,21	4,0	10,69
72	2	T1	14,8	9,1	36	0,78	10,1	54,16
73	2	T1	12,7	7,6	32	1,04	12,0	37,63
74	2	T1	10,1	6,1	55	1,53	8,1	37,17
75	2	T1	8,0	4,7	43	0,17	3,2	1,66
76	2	T2	6,4	2,2	36	0,42	2,1	1,23
77	2	T2	13,9	6,8	31	0,43	6,0	14,34
78	2	T2		3,5	35	0,60	5,0	4,80
79	2	T1	9,2	2,5	49	0,39	3,1	1,93
80	2	T1	5,8	2,3	52	0,51	3,1	0,18
81	2	T2	11,0	6,2	32,5	0,50	2,3	2,96
82	2	T2	16,5	7,5	35	0,22	2,5	3,72
83	2	T1	5,3	2,7	42	0,47	2,6	2,23
84	2	T2		3,5	36	0,62	2,5	3,86
85	2	T2	23,5	7,0	36	0,32	4,5	7,79
86	2	T1	17,7	8,2	46	0,84	10,0	41,84
87	2	T1	6,5	2,8	57	0,68	3,4	4,79
88	2	T1	11,8	4,1	43	0,59	4,3	8,07

nº	pista	sector	longtot (m)	longci (m)	pendci (º)	profmci (m)	anchci (m)	volobs (m3)
89	2	T1	12,2	5,0	47,5	0,51	21,0	39,72
90	2	T1	14,9	7,7	47	0,55	16,7	43,88
91	2	T2	35,8	16,5	32,5	0,97	6,3	63,49
92	2	T2	31,5	15,8	31	0,91	7,0	68,42
93	2	T2	30,5	15,8	33	0,78	12,4	74,48
94	2	T1	7,0	3,5	60	0,84	6,8	8,69
95	2	T1	8,5	5,1	57	0,73	3,6	7,35
96	2	T1	9,4	5,2	56	0,52	3,2	3,65
97	2	T1	12,1	6,5	54	1,32	5,2	19,01
98	2	T1	6,9	3,5	39	0,52	10,4	12,77
99	2	T1		4,3	48	0,77	3,2	1,14
100	2	T1	6,0	3,1	60	0,84	3,9	3,77
101	3	T1	3,0	1,2	62	0,48	2,1	0,42
102	3	T1	2,9	2,0	61	0,62	2,2	1,05
103	3	T1	3,4	1,4	54	0,26	3,4	0,49
104	3	T1	4,9	2,9	59	0,85	2,7	2,82
105	3	T2	5,6	2,1	38	0,51	2,1	0,90
106	3	T2	4,9	2,7	50	0,31	2,7	0,72
107	3	T2	6,4	2,2	43	0,58	2,9	1,46
108	3	T2	5,9	2,0	53	0,37	3,5	1,46
109	3	T1	4,8	2,0	42	0,31	2,4	0,84
110	3	T1	6,2	3,1	40	0,52	11,4	10,46
111	3	T1	3,4	1,7	38	0,70	2,6	2,37
112	3	T1	6,5	3,8	42	0,27	3,1	1,03
113	3	T1	3,4	3,1	56	0,94	2,8	5,97
114	3	T1	4,2	2,3	49	0,58	3,5	2,39
115	3	T1	2,8	1,0	45	0,55	2,7	1,08
116	3	T1	4,3	3,3	46	1,44	3,9	11,65
117	3	T1	5,1	4,1	48	1,42	10,0	34,98
118	3	T1	3,5	1,9	59	0,80	5,0	3,36
119	3	T1	3,2	3,6	37,5	0,46	2,8	2,63
120	3	T2	5,6	3,0	35	0,41	4,1	1,84
121	3	T2	6,1	3,9	35	0,35	2,9	1,82
122	3	T1		2,2	90	1,14	3,0	3,95
123	3	T1	5,7	2,5	57	0,56	5,8	3,87
124	3	T1	4,8	2,7	60	0,53	2,8	2,15
125	3	T1	3,7	2,1	60	0,41	4,0	1,74
126	3	T1	5,7	3,7	65	0,95	4,5	4,41
127	3	T1	5,1	2,0	90	0,35	2,1	1,32
128	3	T1	7,6	2,6	50	0,98	4,3	6,25
129	3	T1	8,0	3,1	63	1,29	7,3	8,88
130	3	T2	7,4	3,6	45	0,27	2,2	0,90
131	3	T2	6,6	2,2	42	0,60	2,0	0,92
132	3	T1	5,1	3,1	65	1,70	3,4	3,98
133	3	T1		1,8		1,80	8,3	14,56
134	3	T1	5,6	2,5	64	2,25	5,1	10,33

nº	pista	sector	longtot (m)	longci (m)	pendci (º)	profmci (m)	anchci (m)	volobs (m3)
135	3	T1		2,2		2,15	4,0	8,77

Longtot (longitud total en metros), **longci** (longitud de la cicatriz en metros), **pendci** (pendiente de la cicatriz en grados), **profmci** (profundidad media de la cicatriz en metros), **anchci** (anchura de la cicatriz en metros), **volobs** (volumen movilizado en metros cúbicos).

APÉNDICE 7 A

MOVIMIENTOS EN MASA Y FACTORES AMBIENTALES Y TOPOGRÁFICOS

Nº	pista	talud	altit	litología	pendlad	seclad	formlad	expos
1	1	T1	1012	marg/arcillas	30-40º	bajo	Cóncavo	93
2	1	T1	1012	marg/arcillas	30-40º	bajo	Cóncavo	93
3	1	T2	1095	pizarras	30-40º	bajo	Recta	100
4	1	T2	1105	pizarras	30-40º	bajo	Recta	95
5	1	T1	1156	pizarras	30-40º	bajo	Recta	150
6	1	T1	1156	pizarras	30-40º	bajo	Recta	150
7	1	T2	1155	pizarras	30-40º	bajo	Cóncavo	120
8	1	T1	1156	pizarras	30-40º	bajo	Cóncavo	113
9	1	T2	1156	pizarras	30-40º	bajo	Recta	130
10	1	T1	1650	pizarras	30-40º	alto	Cóncavo	45
11	1	T1	1655	pizarras	30-40º	alto	Cóncavo	43
12	1	T1	1655	pizarras	30-40º	alto	Cóncavo	44
13	1	T1	1655	pizarras	30-40º	alto	Cóncavo	44
14	1	T1	1655	pizarras	30-40º	alto	Cóncavo	44
15	1	T1	1655	pizarras	30-40º	alto	Cóncavo	47
16	1	T1	1655	pizarras	30-40º	alto	Cóncavo	39
17	1	T1	1655	pizarras	30-40º	alto	Cóncavo	42
18	1	T1	982	marg/arcillas	0-20º	medio	Cóncavo	75
19	1	T1	982	marg/arcillas	0-20º	medio	Cóncavo	75
20	1	T1	982	marg/arcillas	0-20º	medio	Cóncavo	72
21	1	T1	990	marg/arcillas	20-30º	medio	Cóncavo	152
22	1	T1	990	marg/arcillas	20-30º	medio	Cóncavo	152
23	1	T1	990	marg/arcillas	20-30º	medio	Cóncavo	158
24	1	T1	1020	pizarras	0-20º	medio	Convexo	31
25	1	T1	1022	pizarras	0-20º	medio	Convexo	53
26	1	T1	1200	pizarras	0-20º	medio	Cóncavo	126
27	1	T1	1415	pizarras	0-20º	alto	Recta	195
28	1	T1	1680	pizarras	0-20º	alto	Recta	37
29	1	T1	1685	pizarras	0-20º	alto	Recta	26
30	1	T1	1685	pizarras	20-30º	alto	Recta	25
31	1	T1	1685	pizarras	20-30º	alto	Recta	27
32	1	T2	1120	pizarras	30-40º	bajo	Recta	109
33	1	T1	1115	pizarras	30-40º	bajo	Recta	113
34	1	T2	1110	pizarras	20-30º	bajo	Recta	116
35	1	T1	1615	pizarras	30-40º	alto	Cóncavo	48
36	1	T1	1615	pizarras	30-40º	alto	Cóncavo	65
37	1	T1	1690	pizarras	30-40º	alto	Cóncavo	33
38	2	T1	1215	conglom.	20-30º	bajo	Cóncavo	132
39	2	T1	1220	marg/arcillas	20-30º	bajo	Cóncavo	131
40	2	T1	1223	marg/arcillas	20-30º	bajo	Convexo	130
41	2	T2	1260	areniscas	20-30º	bajo	Convexo	148

Nº	pista	talud	altit	litología	pendlad	seclad	formlad	expos
42	2	T2	1260	areniscas	20-30º	bajo	Convexo	153
43	2	T2	1260	areniscas	20-30º	bajo	Convexo	145
44	2	T1	1265	areniscas	30-40º	bajo	Convexo	133
45	2	T1	1265	areniscas	30-40º	bajo	Convexo	130
46	2	T1	1275	areniscas	20-30º	bajo	Convexo	142
47	2	T1	1280	areniscas	20-30º	bajo	Convexo	130
48	2	T1	1280	areniscas	20-30º	bajo	Convexo	130
49	2	T1	1280	areniscas	20-30º	bajo	Convexo	135
50	2	T1	1315	areniscas	20-30º	bajo	Convexo	143
51	2	T1	1316	areniscas	20-30º	bajo	Convexo	144
52	2	T1	1317	areniscas	20-30º	bajo	Cóncavo	140
53	2	T1	1318	areniscas	20-30º	bajo	Cóncavo	140
54	2	T1	1320	areniscas	20-30º	bajo	Convexo	165
55	2	T1	1320	areniscas	20-30º	bajo	Convexo	165
56	2	T1	1325	areniscas	20-30º	bajo	Convexo	182
57	2	T1	1330	areniscas	20-30º	bajo	Convexo	172
58	2	T1	1330	areniscas	20-30º	bajo	Recta	173
59	2	T1	1335	areniscas	20-30º	bajo	Convexo	179
60	2	T1	1335	areniscas	20-30º	bajo	Convexo	180
61	2	T1	1340	areniscas	0-20º	bajo	Convexo	160
62	2	T1	1340	areniscas	0-20º	bajo	Convexo	152
63	2	T1	1345	areniscas	0-20º	bajo	Convexo	217
64	2	T1	1355	areniscas	30-40º	bajo	Convexo	66
65	2	T1	1385	areniscas	20-30º	bajo	Convexo	138
66	2	T2	1380	areniscas	20-30º	bajo	Convexo	138
67	2	T1	1505	marg/arcillas	30-40º	medio	Cóncavo	18
69	2	T1	1525	marg/arcillas	30-40º	medio	Cóncavo	64
70	2	T1	1545	areniscas	20-30º	medio	Convexo	136
71	2	T1	1545	areniscas	20-30º	medio	Convexo	136
72	2	T1	1545	areniscas	20-30º	medio	Convexo	136
73	2	T1	1700	areniscas	20-30º	alto	Convexo	180
74	2	T1	1700	areniscas	20-30º	alto	Convexo	180
75	2	T1	1815	areniscas	20-30º	alto	Cóncavo	150
76	2	T2	1785	areniscas	20-30º	alto	Cóncavo	179
77	2	T2	1825	areniscas	30-40º	alto	Cóncavo	151
78	2	T2	1825	areniscas	30-40º	alto	Convexo	147
79	2	T1	1825	areniscas	30-40º	alto	Convexo	144
80	2	T1	1825	areniscas	30-40º	alto	Convexo	139
81	2	T2	1825	areniscas	30-40º	alto	Convexo	141
82	2	T2	1825	areniscas	30-40º	alto	Convexo	141
83	2	T1	1825	areniscas	30-40º	alto	Convexo	143
84	2	T2	1825	areniscas	30-40º	alto	Convexo	138
85	2	T2	1655	morrenas	0-20º	medio	Cóncavo	64
86	2	T1	1646	morrenas	30-40º	medio	Cóncavo	269
87	2	T1	1646	morrenas	30-40º	medio	Cóncavo	278
88	2	T1	1645	morrenas	30-40º	medio	Cóncavo	278

Nº	pista	talud	altit	litología	pendlad	seclad	formlad	expos
89	2	T1	1645	morrenas	30-40º	medio	Cóncavo	278
90	2	T1	1635	morrenas	30-40º	medio	Cóncavo	282
91	2	T2	1628	morrenas	30-40º	medio	Cóncavo	293
92	2	T2	1630	morrenas	30-40º	medio	Cóncavo	305
93	2	T2	1629	morrenas	30-40º	medio	Cóncavo	301
94	2	T1	1620	areniscas	20-30º	medio	Cóncavo	32
95	2	T1	1615	areniscas	30-40º	medio	Cóncavo	16
96	2	T1	1611	areniscas	30-40º	medio	Cóncavo	23
97	2	T1	1610	areniscas	30-40º	medio	Cóncavo	23
98	2	T1	1585	marg/arcillas	20-30º	medio	Cóncavo	328
99	2	T1	1575	areniscas	20-30º	medio	Cóncavo	336
100	2	T1	1575	areniscas	20-30º	medio	Cóncavo	336
101	3	T1	915	marg/arcillas	0-20º	bajo	Convexo	40
102	3	T1	915	marg/arcillas	0-20º	bajo	Convexo	45
103	3	T1	915	marg/arcillas	0-20º	bajo	Convexo	51
104	3	T1	1000	conglom.	0-20º	medio	Cóncavo	302
105	3	T2	1055	conglom.	20-30º	medio	Convexo	275
106	3	T2	1055	conglom.	20-30º	medio	Convexo	275
107	3	T2	1055	conglom.	20-30º	medio	Convexo	275
108	3	T2	1055	conglom.	20-30º	medio	Convexo	275
109	3	T1	1120	conglom.	0-20º	medio	Convexo	348
110	3	T1	1020	marg/arcillas	0-20º	medio	Recta	235
111	3	T1	1000	marg/arcillas	0-20º	medio	Convexo	187
112	3	T1	1000	marg/arcillas	0-20º	medio	Convexo	184
113	3	T1	1000	marg/arcillas	0-20º	medio	Convexo	185
114	3	T1	990	marg/arcillas	0-20º	medio	Convexo	173
115	3	T1	950	marg/arcillas	0-20º	medio	Convexo	157
116	3	T1	930	marg/arcillas	0-20º	medio	Convexo	160
117	3	T1	920	marg/arcillas	0-20º	bajo	Convexo	315
118	3	T1	920	marg/arcillas	0-20º	bajo	Convexo	310
119	3	T1	915	marg/arcillas	0-20º	bajo	Convexo	305
120	3	T2	885	marg/arcillas	20-30º	bajo	Recta	265
121	3	T2	885	marg/arcillas	20-30º	bajo	Recta	265
122	3	T1	870	marg/arcillas	20-30º	bajo	Cóncavo	189
123	3	T1	810	areniscas	20-30º	bajo	Cóncavo	305
124	3	T1	785	areniscas	20-30º	bajo	Cóncavo	124
125	3	T1	785	areniscas	20-30º	bajo	Cóncavo	124
126	3	T1	780	areniscas	20-30º	bajo	Cóncavo	113
127	3	T1	755	areniscas	20-30º	bajo	Recta	202
128	3	T1	752	marg/arcillas	20-30º	bajo	Cóncavo	147
129	3	T1	750	marg/arcillas	20-30º	bajo	Cóncavo	264
130	3	T2	745	marg/arcillas	20-30º	bajo	Convexo	196
131	3	T2	745	marg/arcillas	20-30º	bajo	Convexo	196
132	3	T1	735	calizas	20-30º	bajo	Convexo	241
133	3	T1	730	calizas	20-30º	bajo	Convexo	240
134	3	T1	730	calizas	20-30º	bajo	Convexo	209

Nº	pista	talud	altit	litología	pendlad	seclad	formlad	expos
135	3	T1	730	calizas	20-30º	bajo	Convexo	209

Altit (altitud en metros), **pendlad** (pendiente de la ladera en grados), **seclad** (sector de la ladera), **formlad** (forma de la ladera), **expos** (exposición en grados) * El número 68 perteneciente a la pista Hoyos de Iregua ha sido eliminado.

APÉNDICE 7B

MOVIMIENTOS EN MASA Y FACTORES AMBIENTALES Y TOPOGRÁFICOS

Nº	pista	talud	pendtal	longtal	alttalud	cvtalud	tipocvtalud
1	1	T1	55	1,15	0,87	6	herbáceas
2	1	T1	55	1,15	0,87	4	herbáceas
3	1	T2	40	5,8	3,4	70	árboles
4	1	T2	44	3,5	2,23	90	matorral
5	1	T1	44	2,05	1,31	12	matorral
6	1	T1	44	2,05	1,31	20	matorral
7	1	T2	39	6,5	3,74	17	herbáceas
8	1	T1	54	1,95	1,46	4	herbáceas
9	1	T2	40	8,47	4,99	85	matorral
10	1	T1	63	2,75	2,3	60	herbáceas
11	1	T1	53	4,54	3,36	8	herbáceas
12	1	T1	53	4,54	3,36	25	herbáceas
13	1	T1	53	4,54	3,36	25	herbáceas
14	1	T1	53	4,54	3,36	25	herbáceas
15	1	T1	53	4,54	3,36	30	herbáceas
16	1	T1	53	4,54	3,36	25	herbáceas
17	1	T1	63	3,85	3,22	55	herbáceas
18	1	T1	34	3,5	1,78	35	herbáceas
19	1	T1	34	3,5	1,78	35	herbáceas
20	1	T1	34	3,5	1,78	60	herbáceas
21	1	T1	58	3,7	2,92	26	matorral
22	1	T1	58	3,7	2,92	26	matorral
23	1	T1	53	4,35	3,22	15	matorral
24	1	T1	50	2,35	1,66	60	matorral
25	1	T1	50	2,35	1,66	85	matorral
26	1	T1	56	3,8	2,93	9	matorral
27	1	T1	47	5,25	3,53	6	matorral
28	1	T1	62	4,7	3,89	9	herbáceas
29	1	T1	55	4,05	3,08	35	árboles
30	1	T1	55	4,05	3,08	35	árboles
31	1	T1	55	4,05	3,08	35	árboles
32	1	T2	44	6,5	4,1	40	árboles
33	1	T1	46	6,17	4,08	90	matorral
34	1	T2	39	4,2	2,41	85	matorral
35	1	T1	55	4,27	3,25	95	herbáceas
36	1	T1	57	4,78	3,73	85	árboles
37	1	T1	52	3,85	2,81	3	herbáceas
38	2	T1	60	3	2,43	23	matorral
39	2	T1	66	2,65	2,28	50	matorral

Nº	pista	talud	pendtal	longtal	alttalud	cvtalud	tipocvtalud
40	2	T1	68	1,95	1,71	80	matorral
41	2	T2		4		13	matorral
42	2	T2		4		13	matorral
43	2	T2	35	4		18	matorral
44	2	T1	64	3,1	2,62	94	matorral
45	2	T1	66	2,25	1,94	87	matorral
46	2	T1	71	2,5	2,24	93	matorral
47	2	T1	58	3,05	2,41	29	matorral
48	2	T1	58	3,05	2,41	60	herbáceas
49	2	T1	71	2,5	2,24	95	matorral
50	2	T1	80	2	1,9	77	herbáceas
51	2	T1	80	2	1,9	77	herbáceas
52	2	T1	50	2,67	1,89	70	matorral
53	2	T1	50	2,67	1,89	70	matorral
54	2	T1	60	3,1	2,51	7	matorral
55	2	T1	60	3,1	2,51	7	matorral
56	2	T1	47			100	árboles
57	2	T1	54	2,35	4,05	93	árboles
58	2	T1	40	1,9	1,12	93	árboles
59	2	T1	43	4,4	2,75	81	árboles
60	2	T1	43	4,4	2,75	57	matorral
61	2	T1	43	4,4	2,75	57	matorral
62	2	T1	66	2,85	2,45	17	matorral
63	2	T1	60	2,05	1,66	4	matorral
64	2	T1	62	4,65	3,84	17	matorral
65	2	T1	46	6	3,97	55	matorral
66	2	T2	37	21,2	11,6	100	árboles
67	2	T1	44	14,4	9,09	81	árboles
69	2	T1	53	5	3,7	67	árboles
70	2	T1	57	4,4	3,43	97	matorral
71	2	T1	57	4,4	3,43	97	matorral
72	2	T1	57	4,4	3,43	97	matorral
73	2	T1	49	8,3	5,78	75	matorral
74	2	T1	49	8,3	5,78	17	matorral
75	2	T1	47	5,6	3,77	90	herbáceas
76	2	T2	31	4,75	2,22	65	herbáceas
77	2	T2	33	10,5	5,2	97	herbáceas
78	2	T2	33	10,5	5,2	95	herbáceas
79	2	T1	46	5,5	3,64	17	matorral
80	2	T1	43	5,05	3,16	23	matorral
81	2	T2	38	8,6	4,78	95	herbáceas
82	2	T2	34	9	4,52	95	árboles
83	2	T1	45	4,35	2,82	45	árboles
84	2	T2	33	7,8	4,4	98	herbáceas
85	2	T2	35	40	20,6	75	árboles
86	2	T1	40	9,46	5,56	5	herbáceas

Nº	pista	talud	pendtal	longtal	alttalud	cvtalud	tipocvtalud
87	2	T1	40	9,46	5,56	80	herbáceas
88	2	T1	40	9,46	5,56	6	herbáceas
89	2	T1	40	6,8	4	14	herbáceas
90	2	T1	43	7,3	4,56	6	matorral
91	2	T2	33	31,5	15,6	65	árboles
92	2	T2	35	20,6	10,7	37	árboles
93	2	T2	35	20,6	10,7	60	árboles
94	2	T1	51	6,3	4,52	41	herbáceas
95	2	T1	46	5,9	3,9	34	herbáceas
96	2	T1	48	7,9	5,41	18	herbáceas
97	2	T1	48	7,9	5,41	18	herbáceas
98	2	T1	54	2,25	1,69	8	herbáceas
99	2	T1	46	5,6	3,7	4	herbáceas
100	2	T1	46	5,6	3,7	4	herbáceas
101	3	T1	62	2,85	2,36	30	herbáceas
102	3	T1	62	2,85	2,36	30	herbáceas
103	3	T1	62	2,85	2,36	30	herbáceas
104	3	T1	47	4,11	2,77	6	matorral
105	3	T2	44	4,89	3,12	60	matorral
106	3	T2	44	4,89	3,12	60	matorral
107	3	T2	47	5,82	3,92	60	matorral
108	3	T2	47	5,82	3,92	45	matorral
109	3	T1	35	3,5	1,83	20	matorral
110	3	T1	43	5,78	3,61	6	matorral
111	3	T1	46	3,3	2,18	56	matorral
112	3	T1	46	3,3	2,18	9	matorral
113	3	T1	46	3,3	2,18	9	matorral
114	3	T1	46	3,8	2,51	4	matorral
115	3	T1	55	2,45	1,86	2	matorral
116	3	T1	55	4,25	3,23	17	matorral
117	3	T1	70	3,3	2,94	2	matorral
118	3	T1	64	3,33	2,81	1	matorral
119	3	T1	64	3,33	2,81	1	matorral
120	3	T2	38	5,4	3,03	5	matorral
121	3	T2	38	5,4	3,03	5	matorral
122	3	T1	56	4,18	3,22	2	matorral
123	3	T1	57	5,46	4,26	4	matorral
124	3	T1	47	3,53	2,37	1	matorral
125	3	T1	47	3,53	2,37	1	matorral
126	3	T1	65	4,35	3,71	1	matorral
127	3	T1	68	4,55	3,99	3	matorral
128	3	T1	59	7,14	5,71	6	matorral
129	3	T1	63	6,95	5,81	3	matorral
130	3	T2	40	6,8	4	2	matorral
131	3	T2	40	6,8	4	1	matorral
132	3	T1	64	3,5	2,95	1	matorral

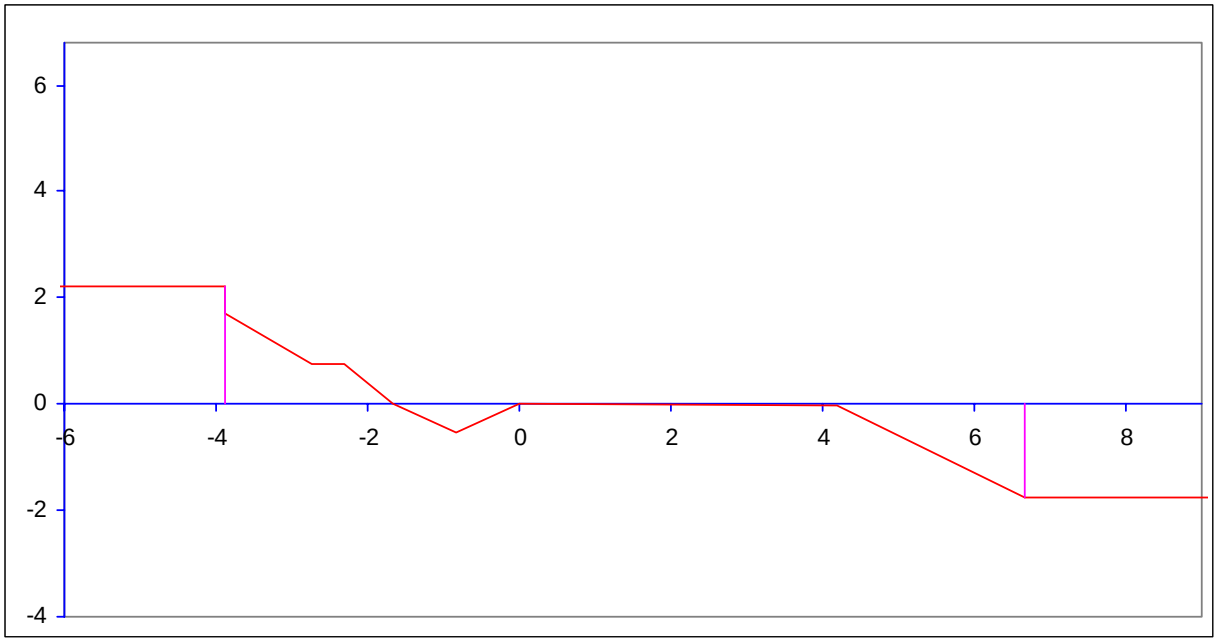
Nº	pista	talud	pendtal	longtal	alttalud	cvtalud	tipocvtalud
133	3	T1	67	5,6	4,86	8	árboles
134	3	T1	67	5,6	4,86	8	árboles
135	3	T1	67	5,6	4,86	8	árboles

Pendtal (pendiente del talud en grados), **longta**l (longitud del talud en metros), **alttal** (alltura del talud en metros), **cvtalud** (cubierta vegetal del talud en porcentaje). **Tipocvtalud** (tipo de cubierta vegetal del talud).

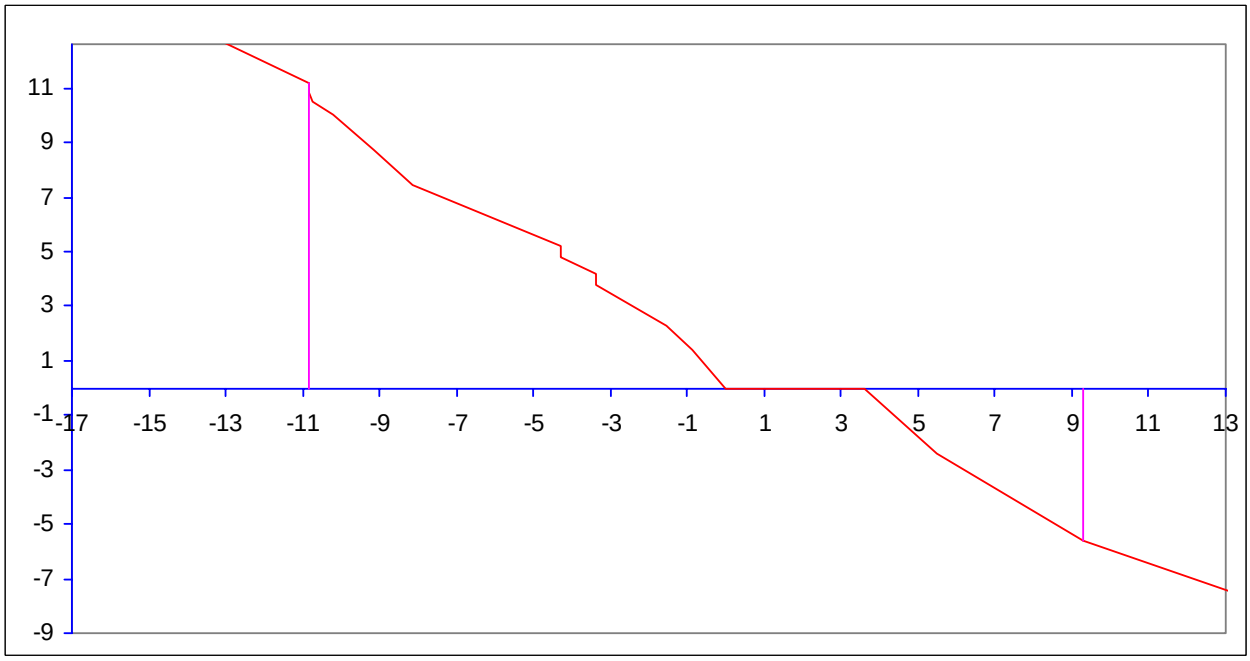
APÉNDICE 8

REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE ALGUNOS PERFILES DE MOVIMIENTOS EN MASA SEGÚN GRUPOS CONSTITUIDOS POR EL ANÁLISIS CLUSTER.

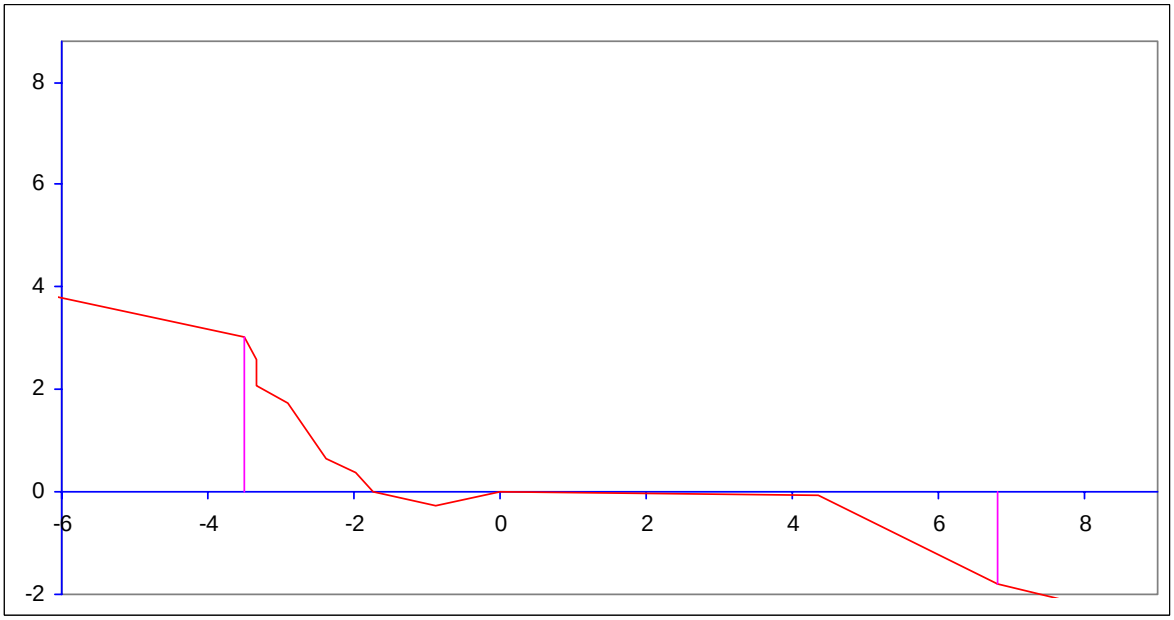
Movimiento en masa perteneciente al Grupo 1 (Valgañón-Ezcaray, TS3).



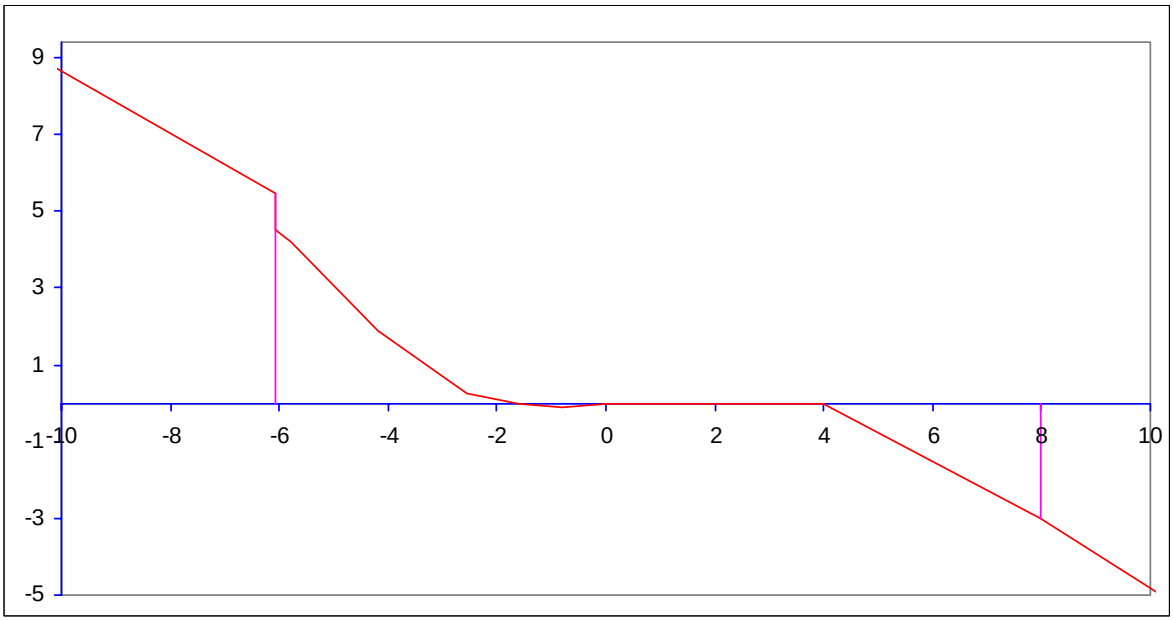
Movimiento en masa perteneciente al Grupo 2 (Valgañón-Ezcaray, TS32).



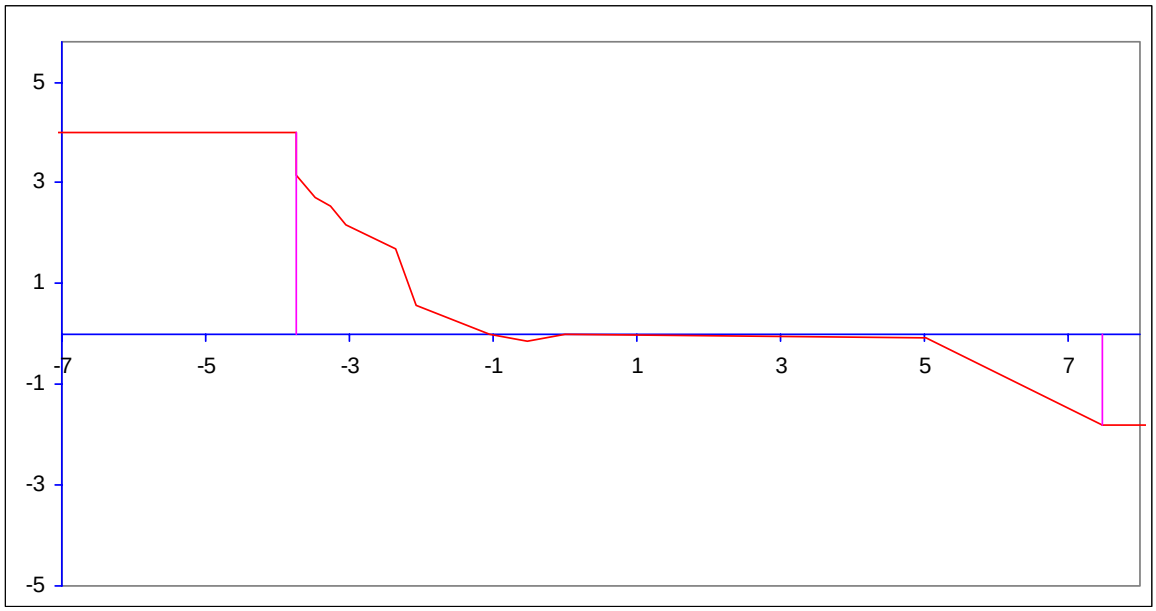
Movimiento en masa perteneciente al Grupo 3 (Ocón-Arnedillo, TS10)



Movimiento en masa perteneciente al Grupo 4 (Hoyos de Iregua, TS24).



Movimiento en masa perteneciente al Grupo 4 (Ocón-Arnedillo, TS20). Perfil completo de la ladera en la que se inserta la pista.



Movimiento en masa perteneciente al Grupo 5 (Hoyos de Iregua, TI9). Perfil completo con el talud superior en zona protegida con muros de gavión en la base del corte-talud.

