

# CRITERIOS GEOMORFOLÓGICOS Y CONSIDERACIONES DE LA DINÁMICA NATURAL EN LA RESTAURACIÓN DE ESPACIOS ALTERADOS

JOSÉ F. MARTÍN-DUQUE (1) Y MIGUEL A. SANZ SANTOS (2)

*Departamento de Geodinámica  
Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid  
(1) josefco@eucmax.sim.ucm.es (2) massinfo@eucmax.sim.ucm.es*

## RESUMEN

La recuperación de espacios y ecosistemas alterados, variablemente transformados por la actividad humana, aparece como una práctica compleja, a menudo con pocas experiencias que sirven como modelo de aplicación. El objetivo de las restauraciones ambientales puede tener buenas intenciones, pero si éstas no se abordan desde una perspectiva integrada, y desde una comprensión de la dinámica natural y de sus escalas temporales de funcionamiento, sus resultados pueden ser decepcionantes. A través de un ejemplo, el artículo argumenta la conveniencia de utilizar criterios geomorfológicos (por ejemplo, en el diseño de reconstrucción de nuevos relieves y en la consideración de la dinámica de los procesos activos) en espacios sujetos a proyectos de restauración ambiental.

## 1. Introducción

Bajo la denominación de restauraciones ambientales, ecológicas o paisajísticas, se incluyen una gran variedad de actuaciones, las cuales abarcan desde superficies medias a grandes (reforestación de tierras agrarias, restauraciones hidrológico-forestales), hasta intervenciones más localizadas (restauraciones de terrenos afectados por obras públicas y minería, recuperación de entornos periurbanos degradados, entre otros). Un objetivo común a todas esas operaciones suele ser la creación/recuperación de la cubierta vegetal.

Sorprende conocer que en muchos de esos proyectos de restauración ambiental no se comience con las cuestiones más básicas posibles: ¿qué situación pretendemos ‘instaurar’ o ‘restaurar’? ¿A qué situación ecológica, ambiental, tipo de cubierta vegetal, tipo de suelo, etc., se quiere llegar? Dado el estado actual de transformación de los ecosistemas que pretendemos manejar, ¿es posible alcanzar dicha situación? ¿En cuánto tiempo? Empezar de esta manera sería muy útil, pues ayudaría a comprender muchas de las limitaciones existentes en este tipo de actuaciones.

Así, todavía es común creer que se pueden recuperar (con cierta facilidad, o en periodos de tiempo relativamente cortos) ecosistemas ‘originales’; es decir: la vegetación potencial o climácica, los bosques ‘autóctonos’, etc. El deseo y la convicción de que es factible restaurar los bosques que se supone cubrieron una gran parte del territorio de la Península Ibérica está muy arraigada en determinados sectores de la opinión pública, en general, y en ambientalistas, políticos, gestores –incluso profesionales– en particular.

En este sentido es conveniente señalar varias cosas. Primero, que las investigaciones más recientes al respecto apuntan que no todos los ecosistemas originales de la península Ibérica eran bosques, sobre todo en los periodos más fríos del Cuaternario; en las condiciones climáticas del Holoceno, y supuesta una nula intervención antrópica, habrían sido los paisajes vegetales más comunes, pero en ningún caso exclusivos (Costa *et al.*, 1990; Suárez *et al.*, 1991). Segundo, que las condiciones ‘naturales’ (es decir, no influidas por la actividad humana), ‘climácicas’ o ‘potenciales’, son difíciles de conocer: son hipótesis, y por tanto están sujetas a interpretación (Goodrich, 1996). Es preciso tener presente además que la posibilidad de recuperar ecosistemas como los que suponemos existieron antes de su modi-



ficación por parte del hombre en los mismos lugares que hoy pretendemos restaurar, es, en la mayor parte de los casos, imposible. Ello es así por varios motivos; entre ellos: a) la vegetación actual es producto de una intensa y prolongada modificación debida a la acción humana, y por tanto los bancos de semillas correspondientes a esas situaciones ‘primigenias’ o ‘primitivas’, previas a la intervención humana, probablemente no existen en el momento presente; b) las características edáficas y la dinámica hidrológica han sufrido también una profunda transformación, sin que de nuevo tengamos patrones validos sobre ‘naturalidad’; c) las propias condiciones climáticas han variado, y están en permanente cambio (reforzado o no por la actividad humana). La posibilidad de revegetar puede estar limitada también por otros muchos factores, tales como la existencia de barreras naturales, una baja capacidad de dispersión de las semillas, ausencia de animales dispersadores, etc. En otros casos, como por ejemplo en obras públicas y minería, ha tenido lugar una profunda transformación del relieve, y tampoco es posible –en la práctica– restablecer la fisiografía original.

De tal manera que, más que ‘recuperar’ o ‘restaurar’ (*volver a poner una cosa en el estado que antes tenía, volver a estados previos*), lo único que podemos conseguir en la mayor parte de los espacios alterados o degradados en los que pretendemos actuar es ‘rehabilitar’, construyendo nuevos sistemas ecológicos, pero casi siempre distintos de los preexistentes.

Con todo, la intención de rehabilitar espacios degradados constituye por lo general un objetivo bien intencionado; sin embargo, los resultados no son siempre los deseados; incluso, pueden ser contraproducentes. En este contexto, el objetivo de recuperar bosques ‘a cualquier precio’, entre otros en el marco de la Política Agraria Comunitaria y mediante la reforestación de tierras (cultivadas o abandonadas), está favoreciendo actuaciones de muy dudoso rigor técnico y científico. Así: frecuentemente se realizan en zonas que llevan

muchos años retiradas del cultivo, y que ya han iniciado un proceso natural de recuperación de los suelos y de la vegetación; el tipo de maquinaria empleada está destruyendo el suelo (delgado y frágil) existente en esos baldíos; con demasiada frecuencia se opera en zonas de pendiente muy elevada (fotos 1 y 2) de manera que las primeras tormentas importantes después de la actuación producen unas pérdidas de suelo desconocidas en esos mismos lugares hasta fechas anteriores a la reforestación, llegando incluso a inducir la formación de surcos, regueros y cárcavas.

## 2. La necesidad de un enfoque dinámico y temporal

Comprender la dinámica de los procesos que operan en la superficie terrestre, y considerar sus escalas temporales de funcionamiento –con mucha frecuencia no equiparables o comparables a la escala humana– puede ser determinante a la hora de abordar un proyecto de restauración ambiental. En primer lugar, es necesario tener en cuenta que los ecosistemas se encuentran en un estado de ‘desequilibrio dinámico’ casi permanente, y que los denominados estados clímax o climácicos son más hipotéticos que reales. Godfrey (2000, pag. 20) ha descrito esta situación, referida a ecosistemas forestales del oeste de Estados Unidos, de la siguiente manera: “*Debido a modificaciones ambientales de distinto alcance temporal, los ecosistemas están siempre ‘reaccionando’ a eventos previos, y muy raramente están en equilibrio con las condiciones ambientales actuales. Las especies responden a esos cambios a una velocidad que es muy poco conocida, y que siempre es menor que la de los eventos que los desencadenan*”. La alternancia dominante entre frondosas y coníferas en los bosques de la Península Ibérica como consecuencia de las variaciones climáticas correspondientes a periodos glaciares e interglaciares a lo largo del Cuaternario constituye otro ejemplo (Costa *et al.* 1990).



Foto 1: Ejecución de proyectos de reforestación en laderas con pendientes entre el 40 y el 60 % y litologías fácilmente erosionables (arcosas). Torredondo (Segovia). Vista general



Foto 2: Ejecución de proyectos de reforestación en laderas con pendientes entre el 40 y el 60 % y litologías fácilmente erosionables (arcosas). Torredondo (Segovia). Detalle.

La estabilidad de la vegetación es pues relativa: hay cambios en su tipología (pastizal, matorral, etc.) y en la composición de especies de un mismo tipo en el tiempo. Cualquier ecosistema es dinámico y ese dinamismo es necesario para su autoorganización (regeneración o recuperación de su estructura original) o para su conservación (mantenimiento de su estructura) (Montalvo *et al.*, 1995). Por otro lado, la sucesión ecológica, influida por múltiples condicionantes, no siempre se dirige hacia las condiciones ‘climáticas’ supuestas. En España, por ejemplo, muchos matorrales que han sufrido incendios, con suelos empobrecidos, presentan una gran limitación para albergar a corto plazo una cubierta arbórea.

En este marco es necesario analizar el papel del hombre como factor ambiental que más ha condicionado (y que sigue condicionando) la dinámica de los ecosistemas en la Península Ibérica. La respuesta de esos sistemas a distintos modos de intervención es compleja (García Ruiz y Lasanta, 1994). Así, mientras en determinadas zonas el abandono de tierras agrarias implica un aumento en la escorrentía y en la producción de sedimentos, en muchas otras, la disminución de la presión agrícola y ganadera que se viene produciendo desde la década de 1960 está favoreciendo una recuperación importante y espontánea de la cubierta vegetal (foto 3).

### 3. Una aproximación integradora

En muchos casos, las restauraciones ambientales están demasiado centradas, bien en criterios estéticos, bien en la biodiversidad. La componente estética, aún siendo importante, no debería ser el criterio principal en la recuperación de espacios degradados. En cuanto a la biodiversidad, tampoco debería ser éste el único objetivo, máxime si ello impide la conservación de otros elementos físicos del ecosistema. Gonggrijp (1999) ha descrito como en Holanda, en nombre de la ‘renaturalización’ y de la creación de biodiversidad,



Foto 3. Recuperación natural de sabinars (*Juniperus thurifera*) en el piedemonte septentrional de la Sierra de Guadarrama.

han sido destruidos elementos de interés histórico-cultural y formaciones geomorfológicas singulares. Parece claro, pues, que este tipo de actuaciones se podrían abordar de forma más adecuada desde una perspectiva multidisciplinar.

### 4. Procesos geomorfológicos activos

Los procesos geológicos y geomorfológicos que han configurado una determinada forma de la superficie terrestre, y sobre todo los fenómenos que actualmente están activos en dicha porción de terreno, influyen de manera decisiva en la dinámica de la superficie terrestre: condicionan el funcionamiento (cambios a corto plazo, estacionales, estabilizaciones) y la estructura (horizontal, vertical, física, complejidad, composición, diversidad de especies, etc.) de los ecosistemas. La comprensión de esos procesos puede ser relevante para el resultado final de una actuación restauradora.

Muchos proyectos de restauración (ambiental, ecológica, hidrológico-forestal, etc.) fracasan precisamente por no considerar esa dinámica, no perceptible en periodos de tiempo reducidos. A escala de años, o decenas de años, los procesos geomorfológicos pueden aparecer como inactivos y por tanto imperceptibles (Schumm, 1991). Sin embargo, son fenómenos ‘latentes’, que contribuyen a ‘dirigir’ la evolución de los sistemas territoriales. En otros casos, a pesar de su actuación permanente, tampoco son ‘visibles’; por ejemplo, los procesos de meteorización química del sustrato sobre el que se desarrolla un suelo, de iluviación, etc., no son observables, y sin embargo condicionan la dinámica ecosistémica.

Así las cosas, es frecuente que muchos proyectos de restauración ambiental no estén en equilibrio con los procesos superficiales activos (erosivos, de sedimentación, meteorización, edáficos, etc.), y por tanto, o bien existe un mantenimiento indefinido, o bien tienden a evolucionar en un sentido distinto al deseado. Un ejemplo lo constituye la variación natural (de su geometría, vegetación, etc.) de muchos taludes restaurados, generalmente inestables para mantener el diseño inicial a largo plazo. Por ejemplo, en climas semiáridos y materiales no consolidados, los procesos de arroyada pluvial, en manto y concentrada, tenderán irremisiblemente a erosionar las partes culminantes de esos diseños, y a acumular los materiales erosionados (además de las semillas y los nutrientes) a su pie; en climas más húmedos, además de la aparición de surcos y regueros por arroyada, los procesos gravitacionales (deslizamiento, flujo y reptación) adquieren mayor importancia, de nuevo transportando materiales de las zonas culminantes hacia su base y configurando distintos perfiles (escarpe-talud, depresión-lengua, etc.). En materiales consolidados, los procesos geomorfológicos habituales



serán de tipo caída y desprendimiento (en pendientes elevadas), y deslizamientos traslacionales o en cuña, y reptación, en taludes menos empinados. En prácticamente todos los casos, la tendencia es a configurar perfiles convexos en las partes culminantes de las laderas y cóncavos en las basales (de micromorfología variable, en función del tipo de roca y el clima). En todo caso, conviene dejar claro que un enfoque geodinámico o ecosistémico no es siempre imprescindible; así, muchos taludes de obras públicas, más que rehabilitarlos hay que estabilizarlos. Sin embargo, enfocar dichas actuaciones desde el conocimiento de los procesos naturales que tendrán lugar en la superficie intervenida abarataría muchos costes y tendría más garantías de éxito, pues ayudaría a escoger la opción más adecuada.

### 5. Relación morfogénesis-edafoagénesis

Los procesos activos sobre el relieve de la superficie terrestre pueden tener una dominancia morfogenética o edafogenética. En el primer caso son preponderantes los fenómenos de erosión o sedimentación, causados por distintos agentes (agua, viento, hielo) y el desarrollo del suelo se ve dificultado por esa inestabilidad; en el segundo caso, la actividad geomorfológica está atenuada, y el proceso fundamental es el desarrollo del suelo. Erhart (1956) definió esos estados como ‘rextasia’ y ‘biostasia’, respectivamente, y los caracterizó como fenómenos geológicos que han coexistido en los sistemas naturales a lo largo de su historia. A pesar de la escasa utilización de estos términos en el lenguaje científico actual, y de su definición para contextos espacio temporales distintos a los que aquí nos ocupan, su contenido y significado sí son extrapolables.

Es preciso pues considerar que la ‘morfogénesis’ (erosión y sedimentación) es también un proceso ‘natural’, cuestión que con frecuencia tiende a olvidarse. La erosión siempre sugiere una imagen de ‘destrucción’, cuando en realidad es el fenómeno mediante el cual se han originado una gran parte de las formas del relieve que hoy vemos (Rodiek, 1986). En este sentido –y en relación con lo ya dicho–, tratar de ‘restaurar’ espacios en los que predomina la erosión o la sedimentación de forma natural constituiría un contrasentido con las propias definiciones de ‘restauración’ y ‘naturalidad’.

Bien es cierto que la influencia de la actividad humana sobre la cubierta vegetal ha aumentado las situaciones de ‘morfogénesis inducida’, y en estos casos sí que parece justificado tratar de restablecer una dinámica fitoestabilizadora. En estos ejemplos, más que priorizar la recuperación inmediata de la vegetación arbórea, sería más efectivo tratar de sentar las bases para la formación y desarrollo del suelo (figura 1), bien actuando sobre sus características físicas y químicas, bien

mediante el empleo de especies herbáceas y arbustivas en la revegetación.

### 6. Utilización de criterios geomorfológicos en proyectos de restauración ambiental. El ejemplo de la cantera La Revilla (Orejana, Segovia)

La aplicación de bases geomorfológicas en la restauración de espacios degradados es más decisiva en aquellos casos en los que ha habido una transformación del relieve original; tal es el caso de la minería y las obras públicas.

En Martín-Duque *et al.* (1997, 1998a, 1998b) se describe un proyecto de restauración ambiental de una explotación minera abandonada (cantera La Revilla, Orejana, Segovia), llevado a cabo por un equipo multidisciplinar compuesto por ingenieros de minas y de montes, geólogos y biólogos; en él, la utilización de criterios geomorfológicos (tanto en el diseño geométrico como en la consideración de los procesos naturales activos) tuvo un papel importante.

#### 6.1. Datos fundamentales del proyecto

La cantera La Revilla fue una explotación de arenas silíceas situada en el piedemonte septentrional de la Sierra de Guadarrama (municipio de Orejana, provincia de Segovia). La altitud media de su localización corresponde a 1.060 m sobre el nivel del mar. La temperatura media anual se sitúa en torno a 11° C, y la precipitación media anual alrededor de 700 mm.

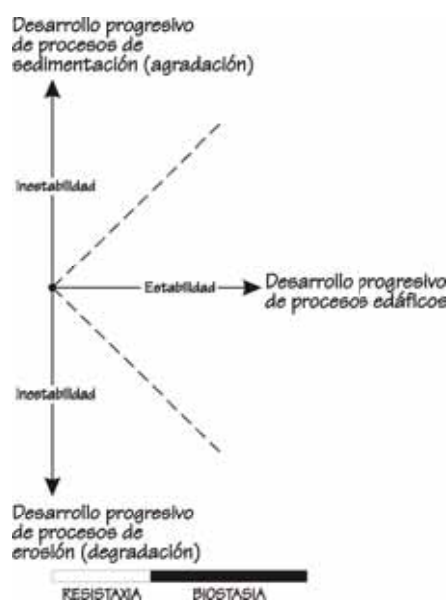


Figura 1. Representación esquemática de la relación entre morfogénesis y edafogénesis en los sistemas superficiales terrestres (Traducido de Panizza, 1988).



*Segundas Jornadas Científicas del Parque Natural de Peñalara y del Valle de El Paular*

Las arenas se extrajeron de las laderas de un pequeño relieve residual tipo ‘mesa’ (figura 2), culminado por una cubierta de rocas carbonáticas (dolomías). Recubriendo las laderas aparecía un depósito superficial coluvionar –formado a expensas de los materiales dolomíticos–, sobre el cual se desarrollaron suelos de tipo leptosol móllico y rendsinico. Dichos suelos y depósitos superficiales tuvieron que ser retirados para alcanzar las arenas objeto de explotación, quedando posteriormente como estériles.

La vegetación del entorno está compuesta por un mosaico de masas dispersas de bosque mixto de encinar (*Quercus ilex*) y sabinar (*Juniperus thurifera*), mezcladas con zonas de matorral y pastizal, y en menor medida por tierras de cultivo.

La explotación de La Revilla se realizó entre finales de la década de 1960 y principios de la de 1980, y se llevó a cabo mediante minería de ladera; los estériles generados se dispusieron de forma anárquica en las inmediaciones de la cantera, a modo de escombreras (foto 4); la superficie afectada por las labores mineras fue de dos hectáreas.

Dado que el material extraído (arenas silíceas) apenas generó estériles, el volumen de los mismos existente en la explotación abandonada era muy pequeño; dichos estériles aparecían mezclados con antiguos suelos, y sobre todo con formaciones superficiales coluvionares de naturaleza carbonática, soporte de los suelos originales (ver figura 2).

Con estos condicionantes de partida, y debido a la existencia de un presupuesto muy reducido para toda la actuación, se estimó que lo más conveniente era invertir el máximo esfuerzo (técnico y económico) en realizar un movimiento de tierras adecuado; es decir, utilizando los propios estériles, diseñar una morfología basada e integrada en el contexto geomorfológico y dinámico del entorno, con el fin de sentar las bases

para que la restauración se produjera progresivamente, de forma espontánea y sin mantenimiento alguno.

Pretender rellenar completamente el hueco de la antigua explotación minera (de donde se extrajeron unos 110.000 m<sup>3</sup> de material, etc.), para ‘restaurar’ la morfología original era, simplemente, inviable; tanto desde un punto de vista económico como ambiental. Su relleno con materiales distintos a los existentes podría haber ocasionado distintos problemas (geotécnicos, contaminación, etc.). Su relleno con los mismos materiales sólo podía hacerse a menos que éstos se extrajeran de otro lugar, ocasionando un hueco y un problema equivalentes.

Sobre la base de este planteamiento, la elaboración y ejecución del proyecto de restauración se desarrolló en los pasos que se resumen a continuación.

- Realización de un estudio geomorfológico regional, prestando especial atención a la configuración morfológica de las laderas circundantes a la cantera y a los procesos activos en ellas.
- Levantamiento topográfico detallado de la cantera y sus inmediaciones (escala 1:500 y equidistancia entre curvas de nivel de 1 m), y cuantificación de los estériles disponibles para la reconstrucción del nuevo relieve (30.000 m<sup>3</sup>).
- Análisis de las propiedades físico-químicas con significado edáfico (textura, contenido en materia orgánica, pH, nutrientes, entre otros) de los distintos estériles existentes en la explotación abandonada.
- Elaboración de un diseño para la reconstrucción de la ladera, basado en la configuración y dinámica geomorfológicas del entorno; el cálculo para la optimización del uso de los estériles disponibles en la reconstrucción de dicha morfología aparece descrito en Martín Duque *et al.* (1998a, pag. 114-118).

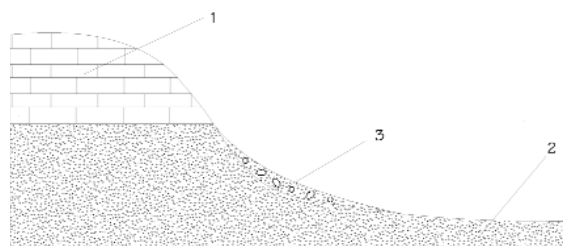


Figura 2. Estructura del relieve original sobre el106 que se instaló la cantera La Revilla. (1) Culminación de rocas dolomíticas. (2) Sustrato de arenas silíceas (material explotado). (3) Depósitos superficiales coluvionares de composición carbonática sobre los que se desarrollaron los suelos de la ladera previos a la explotación.



Foto 4. Aspecto de la cantera abandonada La Revilla con anterioridad a su restauración.



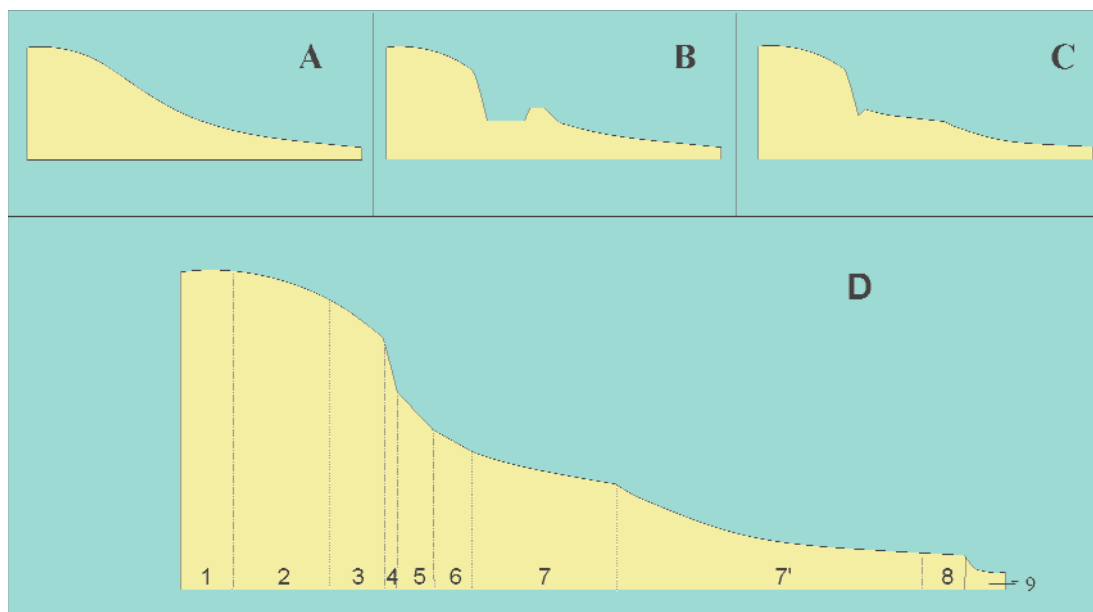


Figura 3. Secuencia evolutiva de la ladera sobre la que se ubicó la cantera La Revilla. (A) Perfil de la ladera original. (B) Perfil tipo de la ladera que quedó como resultado del abandono de la explotación. (C) Perfil reconstruido con la restauración (nótese la morfología en glacis y el pequeño surco situado al pie del antiguo frente de explotación). (D) Hipótesis de evolución de la superficie rehabilitada, y unidades morfológicas definidas por sus procesos geomorfológicos y edáficos activos: 1, infiltración y lavado; 2, infiltración e inicio de movimientos laterales; 3, infiltración y reptación; 4, caídas, desprendimientos, deslizamientos y vuelcos; 5, acumulación de derrubios, 6, sedimentación coluvial; 7 y 7', dominio de procesos edafogénicos, y en menor medida de arroyada en manto (7 corresponde a la superficie rehabilitada); 8, procesos de inundación; 9, cauce o canal.

- Separación, retirada y acopio de los estériles con propiedades edáficas (formaciones superficiales coluvionares, de naturaleza carbonática y textura franca y francoarenosa, que recubrían las arenas previamente a su explotación) (ver figura 2).
- Reconstrucción de una nueva morfología (tipo glacis) en el antiguo hueco de explotación según el diseño previsto (ver figura 3C), utilizando para ello los estériles sin capacidad edáfica (arenas y arcillas).
- Sobre esa superficie reconstruida se extendieron las formaciones superficiales coluvionares carbonáticas (foto 5), como material de partida para el desarrollo de un nuevo suelo de características similares al original.
- La presencia del antiguo frente de explotación, y el estudio de su dinámica en esta localización y en otras similares, hicieron aconsejable diseñar un surco al pie de dicho escarpe, a fin de que el primero fuera acumulando los materiales movilizados desde el segundo por distintos procesos, principalmente gravitacionales (desprendimientos y deslizamientos) y en menor medida de arroyada; de esta manera, los materiales caídos desde el antiguo frente no lo harían sobre la superficie restaurada (lo que impediría su recuperación), y por otro lado se sentaban las bases para que la ladera tendiera a alcanzar una configuración ‘natural’ con el tiempo: perfil escarpe-talud de derrubios (figura 3D).
- La existencia de un suelo completamente desnudo tras el proceso de rehabilitación hacía necesario crear una cubierta vegetal herbácea de forma rápida, capaz de impedir los procesos de erosión por arroyada en manto y concentrada los primeros años, y de iniciar los procesos de colonización vegetal y evolución del suelo. Por ello, la superficie rehabilitada se sembró a voleo con una mezcla de gramíneas y leguminosas, adaptada a las características climáticas y del substrato. La preparación del terreno para la revegetación, y el tapado de las semillas se realizó con un tractor agrícola; en las zonas con mayor pendiente se utilizó el sistema tradicional de rastras (foto 6).



Foto 5. Extendido de depósitos coluvionares sobre la superficie del glacis, reconstruyendo una estructura de ladera similar a la original (ver figura 2). El empleo de maquinaria pesada en el movimiento de las formaciones superficiales obligó a una posterior descompactación de la superficie reconstruida.

## 6.2. Primeros resultados, seguimiento y control

El proyecto brevemente descrito planteaba una hipótesis de evolución del espacio rehabilitado según la cual éste tendería a integrarse progresivamente en el entorno en el que se ubica (perfil de las laderas y recuperación de la cubierta vegetal local); la monitorización de dicha superficie en el futuro será la que confirme o desmienta el ajuste a dicho planteamiento.

Hasta el momento, cinco años después de la ejecución del proyecto de restauración, ya se han iniciado los procesos de evolución geomorfológica del antiguo frente de explotación con relleno del surco a su pie, así como los procesos de edafogénesis y colonización-sucesión ecológica en la superficie del glacis. En todo caso, es necesario recalcar que aún es pronto para pronunciarse en un sentido u otro, en tanto se trata de una restauración enfocada 'a largo plazo'.

Con el seguimiento periódico de la superficie rehabilitada se pretende controlar su evolución natural en sus dos sectores bien diferenciados. En el primero de ellos (antiguo frente de explotación y surco), donde domina la actividad morfogenética, se están monitorizando los procesos activos y sus resultados (micromorfología del escarpe). En el segundo sector (superficie del glacis), donde domina la edafogénesis y la recuperación de la cubierta vegetal, se está realizando un seguimiento de la variación de las propiedades edáficas, así como de la cubierta vegetal, con el tiempo.

### 6.2.1. Evolución geomorfológica del escarpe

En el cantil que compone el antiguo frente de explotación ya se han iniciado los procesos de caídas, desprendimientos y deslizamientos (rotacionales, traslacionales y en cuña). Dichos procesos hacen retroceder la ladera de forma paralela a su configuración actual en su parte culminante, mientras que el material movilizado por esos procesos se acumula en el surco, al pie del



Foto 6. Tapado de las semillas utilizando sistemas tradicionales y recursos locales.

escarpe, formando un talud coluvial y de derrubios. En conjunto, dichos procesos tienden a configurar un perfil 'natural' de la ladera (foto 7).

### 6.2.2. Edafogénesis

La evolución del suelo en la superficie rehabilitada está siendo y será monitorizada mediante la realización de análisis edáficos completos (físicos y químicos) de forma periódica. La tabla 1 muestra una primera comparación entre valores medios para algunas de las propiedades que varían de manera más rápida en suelos jóvenes: pH, nitrógeno (N), y materia orgánica (m.o.).

	(1)	(2)	(3)	(4)
pH	?	7.7	7.9	7.8
m.o. (%)	?	3.82	0.31	0.76
N (%)	?	0.15	0.012	0.038

Tabla 1. Valores medios pH, materia orgánica (m.o.) y N (nitrógeno total Kjeldahl) para distintas situaciones de la localización La Revilla: (1) suelos originales, sin modificación antrópica; (2) valores medios de ocho muestras de suelos actuales del entorno de la explotación minera (análisis de suelos de una ladera contigua a la cantera, año 1995); (3) valores medios de ocho muestras de material de partida para la restauración (formaciones superficiales coluvionares, año 1995); (4) valores medios de ocho muestras de suelos de la superficie restaurada, tres años después de la ejecución de los trabajos de restauración (año 1998).

La inclusión de la primera columna (1) tiene por objeto dejar patente la imposibilidad de conocer las características de los suelos de esta región en una situación hipotética de no intervención humana, y por tanto 'natural' en sentido estricto (enlazando con la discusión propuesta al principio del artículo). No sabemos cuáles fueron los valores de las distintas propiedades edáficas de los suelos de estas laderas en ese estado primitivo, y en definitiva, los valores hacia los que habría que tender en caso de desear una 'renaturalización' del espacio.



Foto 7. Evolución del antiguo frente de explotación por procesos gravitacionales; el material caído tiende a rellenar el surco, formando un talud de derrubios y otorgando a la ladera un aspecto 'natural' (ver figura 3D).



La segunda columna (2) muestra los valores de suelos de laderas similares y próximas a la explotación minera, que sirven como primera aproximación para conocer las características de los suelos inmediatamente anteriores a la ubicación de la cantera. Pero parece claro que éstos no deberían ser los parámetros a restaurar, en tanto se trata propiedades correspondientes a suelos profundamente modificados por acciones humanas (zonas de cultivos en bancales abandonados, posteriormente sujetas a sobrepastoreo).

La tercera columna (3) representa los valores de los materiales coluvionares que se utilizaron como material de partida para ‘construir suelo’, sin apenas materia orgánica y nutrientes, pero con una textura adecuada (franca) para iniciar procesos edafogénicos. La cuarta columna (4) muestra los primeros resultados de la superficie ya rehabilitada. En ella puede observarse que los suelos restaurados han sufrido un ligero aumento en el contenido de materia orgánica y nitrógeno, si bien el incremento es tan pequeño, y el tiempo transcurrido tan corto, que sólo la obtención de nuevos datos en futuros análisis ayudará a comprender la dinámica evolutiva de los suelos restaurados.

Sin embargo, la tabla 2 permite obtener interpretaciones interesantes. LR-1, LR-2, LR-3 y LR-4 corresponden a cuatro muestras de suelos, analizadas en 1998, situadas transversalmente a la superficie del glacis (LR-1 en la parte superior y LR-4 en la base). Mientras en 1995, las propiedades edáficas se distribuían homogéneamente por toda la superficie rehabilitada (datos de la columna 3 de la tabla 1), tres años después ya se observa un gradiente en la variación de dichas propiedades ladera abajo, con un aumento de materia orgánica (m.o.), N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y K. Dicha variación revela flujos superficiales —y posiblemente subsuperficiales— de escorrentía, que pone de manifiesto una recuperación de la dinámica hidrológica de la ladera característica en las vertientes del entorno de la superficie rehabilitada (lavado-acumulación a partir de morfologías de glacis).

**Tabla 2**

	N	m.o.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sup>+</sup>
	%	%	(mg/100 g)	(mg/100 g)
LR-1	0.041	0.59	7.5	0.9
LR-2	0.032	0.74	7.5	1.1
LR-3	0.042	0.83	20	3.5
LR-4	0.071	1.30	15	1.15

Tabla 2. Variación de determinadas propiedades edáficas a lo largo de un perfil transversal a la superficie rehabilitada. LR-1 corresponde a la parte culminante del glacis (la más próxima al antiguo frente de explotación) y LR-4 a la base del glacis.

### 6.2.3. Evolución de la cubierta vegetal

La mezcla de semillas empleada ha conseguido establecer una cubierta vegetal ‘permanente’ (foto 8), que ha anulado la actuación de los procesos de arroyada. Al mismo tiempo, esa cubierta está haciendo posible la formación y desarrollo de un nuevo suelo, al aportar restos orgánicos que se incorporarán a la estructura del suelo a través de la humificación (foto 9).

Es probable que con la utilización de especies autóctonas pudieran haberse conseguido resultados similares, si bien la disponibilidad comercial de las mismas sigue siendo un handicap. A partir del momento actual podría empezar a considerarse la posibilidad de introducir especies locales (fundamentalmente arbustivas) con el objetivo de acelerar un proceso de recuperación de la vegetación del entorno, el cual, por otra parte, ya se está produciendo de forma espontánea.

Así, en el periodo de tiempo transcurrido desde la finalización de los trabajos de rehabilitación, las especies dominantes en las inmediaciones de la antigua cantera ya han comenzado a invadir la superficie rehabilitada, mientras que la mezcla de gramíneas y leguminosas tiende a desaparecer progresivamente, y no está invadiendo los alrededores de la zona recuperada. Parece pues que la vegetación circundante acabará por imponerse a las especies sembradas. En realidad, puede considerarse que el espacio rehabilitado se com-



Foto 8. Recubrimiento vegetal sobre la superficie restaurada (mayo 1997); a la derecha, antiguo frente de explotación. Compárese con la foto 4.



Foto 9. Residuos orgánicos sobre la superficie rehabilitada, inicialmente desnuda.



porta en el momento actual como una tierra de cultivo abandonada, que tiende a ser progresivamente colonizada por las especies del entorno.

En definitiva, esa variación y sustitución de especies en la superficie rehabilitada muestra que ya existe una sucesión ecológica, con composiciones florísticas transitorias, distintas a cualquier otra preexistente en esa zona a lo largo del tiempo, pero que tiende a evolucionar en el marco de una recuperación espontánea de la cubierta vegetal (ver foto 3). Las fotografías aéreas oblicuas 10 y 11 muestran una primera comparación visual en la evolución de la cubierta vegetal de la superficie restaurada.

#### 6.2.4. Evolución en el tiempo

El análisis comparado de las fotografías aéreas verticales correspondientes a distintos años (1946, 1956, 1984 y 1998), montadas para su visión tridimensional con estereoscopio de bolsillo (figura 4) y con anaglifos (figura 5), permite obtener nuevas conclusiones. Así, la ladera sobre la que posteriormente se ubicaría la cantera mostraba tanto en 1946 como en 1956 morfologías de erosión activa en regueros y cárcavas, consecuencia de distintas actividades humanas (sobrepastoreo, cultivos y pequeñas explotaciones de mineral) en tiempos históricos. La imagen de 1984 muestra el final de la explotación, con abundancia de tonos claros (correspondientes a los frentes y huecos de explotación, totalmente descubiertos de vegetación y sujetos a procesos intensos de erosión hídrica).

La imagen de 1998, tres años después de la restauración, muestra una situación en la que apenas es perceptible la antigua explotación, con un mayor grado de recubrimiento vegetal (tonos grises) que el existente incluso con anterioridad a la explotación (imágenes de 1946 y 1956). La posibilidad de formación y desarrollo de un nuevo suelo, a partir de materiales descompactados, está permitiendo una mejora en las condiciones ambientales (hidrológicas, edáficas y de la vegetación)



Foto 10. Aspecto que ofrecía la superficie restaurada en mayo de 1996, un año después de la restauración. Paisajes Españoles S.A.

con respecto a situaciones anteriores a la explotación minera y a los suelos circundantes (muy compactados por sobrepastoreo).

### 7. Conclusiones

El manejo de ecosistemas para su recuperación y restauración aparece como una práctica compleja. En todo caso, parece claro que este tipo de actuaciones deberían abordarse desde una perspectiva multidisciplinar, más adecuada para comprender los múltiples y complejos procesos implicados en la recuperación de espacios degradados.

La incorporación de consideraciones sobre la dinámica natural de los ecosistemas, así como sobre sus escalas temporales de actuación, o sus tendencias evolutivas, rara vez son tenidas en cuenta en este tipo de actuaciones, cuando en realidad son determinantes para el éxito final de muchos procesos restauradores.

La comprensión de los procesos geomorfológicos y edáficos que actuarán en un espacio objeto de restauración ambiental, y nuestra capacidad para 'dirigir' dichos procesos en un sentido u otro, pueden ser decisivos para el resultado de la actuación restauradora a medio y largo plazo. La gestión de la sucesión ecológica (Luken, 1990), y no sólo la gestión de la vegetación, debe ser una parte fundamental de cualquier estrategia rehabilitadora.

### 8. Agradecimientos

Deseamos agradecer la colaboración de Javier Montalvo y Saturnino de Alba en la lectura del manuscrito original. Sus comentarios han hecho posible mejorar ostensiblemente el resultado final. Javier Pedraza, Andrés Díez, Rosa M. Carrasco y Luis Polo son coautores del proyecto de restauración ambiental de La Revilla que ha servido como punto de partida para la elaboración del artículo. Arenas Silíceas Martín S.L. fue la promotora de esta iniciativa de recuperación ambiental.



Foto 11. Aspecto que ofrecía la superficie restaurada en mayo de 1998, tres años después de la restauración. Paisajes Españoles S.A.

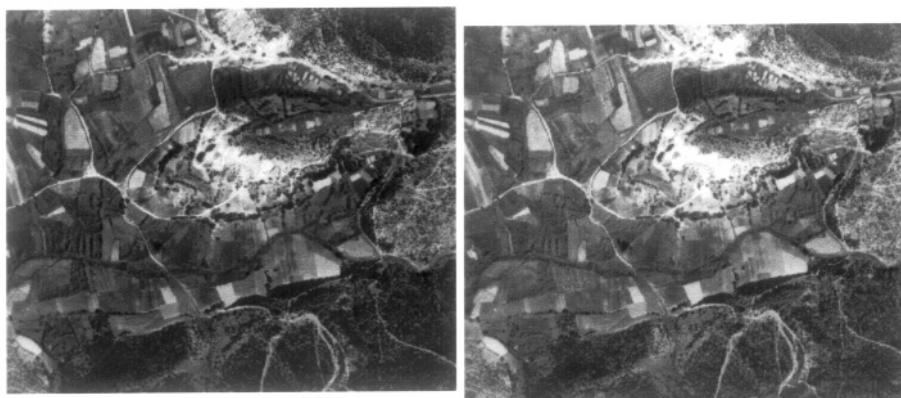




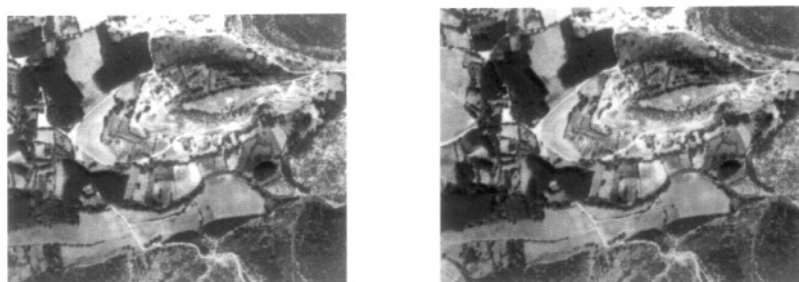
1946



1956



1984



1998

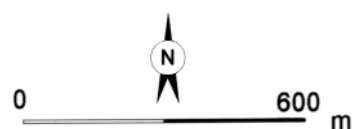


Figura 4. Evolución durante el periodo 1946-1998 del espacio en el que se ubicó la explotación minera La Revilla, posteriormente restaurado. Comparación a través de fotografías aéreas preparadas para su visión tridimensional con estereoscopio de bolsillo. Los pares estereoscópicos se han construido seleccionando el área objeto de comparación a partir de dos fotogramas aéreos consecutivos y con capacidad para su observación estereoscópica. A cada uno de los pares se le ha aplicado un balance de tonalidades de grises para obtener en cada uno de ellos la mayor definición tonal posible. El paso siguiente ha sido el escalado de los fotogramas a una relación común a todos los pares; terminando con la orientación de las porciones y la separación focal entre ellas, para lo que se ha establecido una distancia de 6 cm, correspondiente a la media de la separación entre el centro de las pupilas en el ojo humano. Fuente de las distintas fotografías aéreas: 1946, Vuelo americano Serie A, Centro Cartográfico y Fotográfico del Ejército; 1956, Vuelo americano Serie B, Servicio Geográfico del Ejército; 1984, vuelo nacional del Instituto Geográfico Nacional; 1998, vuelo nacional del Instituto Geográfico Nacional. Véase texto para su interpretación.



Segundas Jornadas Científicas del Parque Natural de Peñalara y del Valle de El Paular

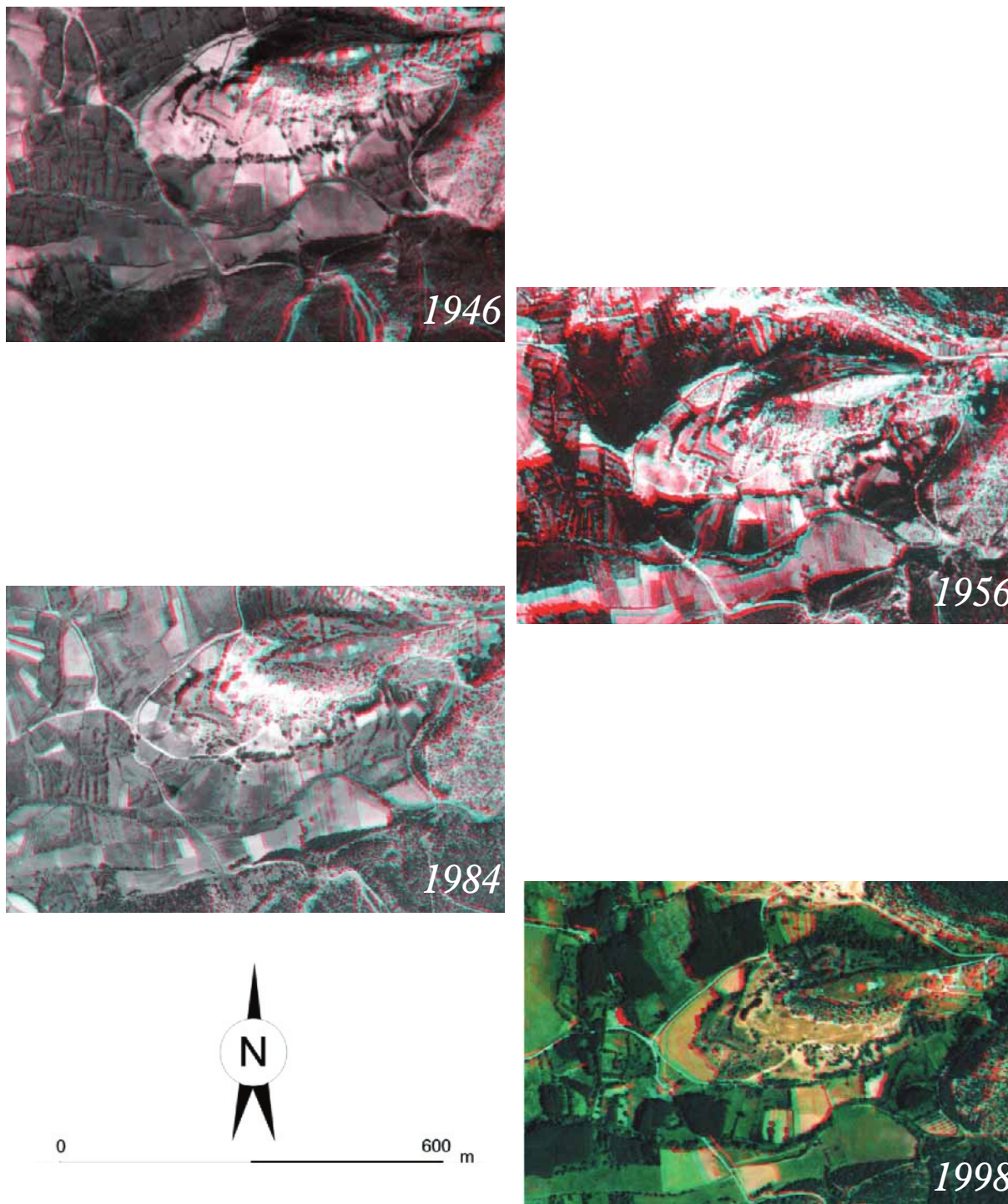


Figura 5. Evolución durante el periodo 1946-1998 del espacio en el que se ubicó la explotación minera de La Revilla, posteriormente restaurado. Comparación a través de anaglifos (preparados para su observación con gafas específicas, situando el color azul en el ojo izquierdo y el rojo en el derecho). La creación de los anaglifos se ha llevado a cabo a partir de las porciones de fotografía aérea de los pares estereoscópicos de la figura 4. El montaje se ha realizado en varios pasos, comenzando por la conversión de las fotografías en blanco y negro a una paleta de 16 millones de colores (RGB), lo que ha permitido reforzar las tonalidades verdes y azules para el fotograma derecho y rojos para el izquierdo; la intensidad de los tonos está ajustada a la de los filtros utilizados, por lo que en algunos casos pueden existir problemas de visionado. Es importante en este paso no eliminar toda la gama de grises, ya que éstos permitirán, después del montaje final, tener una gama rica de tonos que no se enmascaren con los filtros de las gafas. El paso siguiente puede realizarse de dos formas diferentes, dependiendo de las herramientas de tratamiento gráfico que posea el programa de retoque fotográfico. Una de las técnicas es montar los fotogramas como si fueran capas de un único dibujo, otorgando a una de ellas características de transparencia; la otra, utilizada aquí, consiste en cortar la imagen variada a tonos azules claros y pegarla sobre la imagen en rojo. La mezcla se obtiene haciendo que la imagen pegada entre en la composición final por el canal correspondiente a las tonalidades rojas. Por último resta ajustar las imágenes para la máxima estereoscopia y mínima deformación, que se realiza en la parte central del fotograma final, moviendo la imagen pegada hasta conseguir el mínimo desfase de tonos de color rojo y azul respecto a un punto; si la operación se realiza adecuadamente, podremos realizar 'zooms' sobre la imagen obtenida sin perder la estereoscopia. La última fase será escalar todas los anaglifos creados a la misma razón y obtener una escala gráfica. Fuente de las distintas fotografías aéreas: 1946, Vuelo americano Serie A, Centro Cartográfico y Fotográfico del Ejército; 1956, Vuelo americano Serie B, Servicio Geográfico del Ejército; 1984, vuelo nacional del Instituto Geográfico Nacional; 1998, Servicio de Ordenación del Territorio, Junta de Castilla y León. Véase texto para su interpretación.



### Referencias bibliográficas

- COSTA, M., GARCÍA-ANTÓN, M., MORLA, C. y SAINZ OLLERO, H. 1990. La evolución de los bosques de la Península Ibérica: una interpretación basada en datos paleobiogeográficos. *Ecología*, Fuera de Serie Nº 1, pp. 31-58.
- ERHART, H. 1956. *La gènesis des sols en tant que phénomène géologique*. Masson, Paris.
- GARCÍA RUIZ, J.M. y LASANTA, T., Eds., 1994. *Efectos geomorfológicos del abandono de tierras*. Sociedad Española de Geomorfología. Zaragoza.
- GODFREY, A.E. 2000. Ecosystem and Scale concepts: their effect on Environmental Information Management. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Sección Geológica)* Vol. 96 (1-2): 19-31.
- GONGGRIJP, G.P. 1999. Geodiversity: the key to a holistic approach in renaturation. In: D. Baretino, M. Vallejo, y E. Gallego (Eds.), *Towards the Balanced Management and Conservation of the Geological Heritage in the New Millennium*, pp. 77-80, Madrid.
- GOODRICH, S. 1996. *Ecosystem management or an ecological approach to management and rangeland condition*. <http://www.fs.fed.us/eco/emrange.htm>
- LUKEN, J.O. 1990. *Directing ecological succession*. Chapman & Hall, London.
- MARTÍN DUQUE, J.F., PEDRAZA, J., DÍEZ, A., SANZ SANTOS, M.A., CARRASCO, R.M. y POLO, L. 1997. Restauración de canteras de arenas silíceas en la Sierra de Guadarrama (Segovia). *Ingeopres*, 54:44-50.
- MARTÍN DUQUE, J.F., PEDRAZA, J., DÍEZ, A., SANZ SANTOS, M.A. y CARRASCO, R.M. 1998a. Criterios geomorfológicos en la restauración del paisaje. Metodología aplicada a terrenos afectados por explotaciones mineras abandonadas. En: *II Congreso de Ingeniería del Paisaje*, pp. 43-53. A Coruña.
- MARTÍN-DUQUE, J.F., PEDRAZA, J., DÍEZ, A., SANZ, M.A., CARRASCO, R.M. 1998b. A geomorphological design for the rehabilitation of an abandoned sand quarry in Central Spain. *Landscape and Urban Planning*, 42, 1-15.
- MONTALVO, J., CASADO, M.A., LEVASSOR, C. y PINEDA, F.D. 1995. The strategies of ecological succession: Theoretical insights from experimentally disturbed ecosystems. In: D. Belland, G. Bonin y C. Emig (eds.), *Functioning and dynamics of natural and perturbed ecosystems*, pp.231-262. Lavoissier, Paris.
- PANIZZA, M. 1988. *Geomorfologia applicata. Metodi di applicazione alla Pianificazione territoriale e alla Valutazione d'Impatto Ambientale*. La Nuova Italia Scientifica, Roma.
- RODIEK, J. 1986. Landscape erosion and landscape development. En: A. Ramos (coord.), *Jornadas Internacionales sobre el Paisaje del Agua*, pp. 67-81. Canal de Isabel II, Madrid.
- SCHUMM, S.A. 1991. *To interpret the Earth. Ten ways to be wrong*. Cambridge University Press. Cambridge.
- SUÁREZ, F., SAINZ OLLERO, H., SANTOS, T. y BERNÁLDEZ, F.G. 1991. *Las estepas ibéricas*. Unidades Temáticas Ambientales de la Secretaría de Estado para las Políticas del Agua y el Medio Ambiente. Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Madrid.

