

EFECTOS DE LAS TÉCNICAS DE PREPARACIÓN DEL TERRENO SOBRE LAS PROPIEDADES DE LOS SUELOS EN PLANTACIONES FORESTALES

Agustín MERINO^(1,*), Guzmán OURO⁽¹⁾ y José Miguel EDESO⁽²⁾

⁽¹⁾ Departamento de Edafología y Química Agrícola, Universidad de Santiago de Compostela, Escuela Politécnica Superior, E-27002 Lugo, España. *(amerino@lugo.usc.es)

⁽²⁾ Departamento de Minería, Metalurgia y Ciencias de los Materiales, Universidad del País Vasco, Vitoria.

Abstract: Soil fertility and tree nutrition of young radiata pines were examined after the harvesting and site preparation in a hilly area of Northern Spain. Conventional stem-only harvesting was compared with other highly mechanized techniques employed in the region. Such techniques were a) whole-tree harvesting and humus layer removal and b) whole-tree harvesting and humus layer removal followed by down-slope deep ploughing. Due to soil disturbance and accelerated erosion, intense site preparation labours negatively affected soil properties that are important to site productivity. Highly mechanized practices led to higher soil compaction and depletions of organic matter, N, S and Ca²⁺ in the rooting layer. Four years after site preparation practices, the bulk density of the ploughed soils still had high values. These soils still showed very low content of organic matter, total N and exchangeable Ca²⁺ and Mg²⁺. Additional depletions of total S and N took place over this time. In conventionally harvested sites and in less disturbed soils bulk density increased, probably due to exposure to the raindrop impact. In these soils, exchangeable K⁺ rose, most likely as a consequence of the rapid release of this element from logging rests and soil organic matter decomposition.

Key words: soil management, soil properties, organic matter, forest nutrition, forest plantations.

Resumen: En este trabajo se examinan las propiedades de los suelos después de la tala y aplicación de diferentes labores de preparación del terreno para la próxima rotación forestal. Se evalúa también la evolución de las alteraciones producidas en un período de 4 años. Para el trabajo se seleccionaron 58 plantaciones de *Pinus radiata* del País Vasco, localizadas en pendientes superiores al 35 % y sobre suelos desarrollados sobre argilitas con propiedades similares. Las técnicas de preparación del terreno estudiadas consistieron en a) manejo convencional, en el que los restos orgánicos se distribuyen sobre la superficie del terreno, b) extracción total de la planta (restos no maderables y tocón) y retirada del horizonte orgánico y c) extracción total de la planta, retirada del horizonte orgánico y arado profundo. El manejo convencional de los restos de tala produjo mínimas modificaciones en las propiedades de los suelos. La retirada de material orgánico y el arado profundo incrementaron la densidad aparente y redujo el contenido de materia orgánica, N, S, Ca²⁺ y Mg²⁺ en la profundidad de enraizamiento del suelo. Después de 4 años los suelos más alterados no recuperaron sus propiedades, mientras que los sometidos al tratamiento intermedio mejoraron su contenido en materia orgánica y nutrientes. Los resultados de este trabajo muestran que las labores intensivas de

preparación del terreno conllevan modificaciones importantes en las propiedades físicas y nutricionales de estos suelos que pueden derivar en problemas de conservación de los mismos y en un descenso de la productividad forestal.

Palabras clave: manejo de suelos, propiedades de los suelos, materia orgánica, nutrición forestal, plantaciones forestales.

INTRODUCCIÓN

La explotación de especies forestales de rápido crecimiento en turnos cortos implica la extracción de importantes cantidades de biomasa y nutrientes que puede afectar a la reserva nutricional del suelo y a la producción forestal (Madeira, 1989). Aunque los aportes de algunos elementos a través de la atmósfera y alteración mineral pueden ser importantes, la mayor parte de los requerimientos anuales son suministrados por la descomposición de residuos orgánicos en el suelo (Waring y Schlesinger, 1985). Algunas técnicas intensivas de preparación del terreno, conducentes en eliminar la vegetación competidora y facilitar el establecimiento de la siguiente rotación, consisten en la retirada de restos de tala y del horizonte orgánico del suelo. Puesto que estos componentes orgánicos juegan un papel importante como reserva de nutrientes, así como en la regulación de humedad y estructura del suelo, estas labores pueden derivar en profundas alteraciones de las propiedades edáficas y de la dinámica de nutrientes (Munson et al., 1993; Clayton y Kennedy, 1985; Madeira, 1989; Olsson et al., 1996a). La retirada de restos, por consiguiente, puede reducir sensiblemente la capacidad del sistema para restituir los nutrientes extraídos durante la explotación forestal (Madeira, 1989). Este aspecto es particularmente importante para determinados elementos, como el N o el P, en los que el aporte por descomposición de compuestos orgánicos es la principal fuente de nutrición forestal. Además, las técnicas que emplean maquinaria pesada pueden alterar negativamente las propiedades físicas del suelo. El paso de estos equipos y las perturbaciones físicas que producen en el suelo aumentan su compactación,

reduciendo la porosidad y la conductividad hidráulica, con la consiguiente repercusión en el desarrollo radicular y crecimiento de la planta (Froehlich, 1979). Además, como resultado de la mayor escorrentía pueden derivar en considerables pérdidas por erosión (Farrish et al., 1993).

En las provincias de Vizcaya y Guipúzcoa, las plantaciones de pino radiata, explotado en turnos de 20 a 30 años, representan el 80 % de la superficie forestal. En los últimos años se viene empleando una técnica de preparación del terreno altamente mecanizada, que consiste en un arado profundo a favor de la pendiente, que se realiza después de la retirada total de restos de tala, destocoado y decapado del horizonte orgánico. Los productores creen que estas labores mejoran el establecimiento de la nueva plantación en algunos suelos arcillosos porque potencian la conductividad hidráulica. Sin embargo, a pesar de que la mayor parte de las plantaciones se encuentran en pendientes superiores al 30 %, esta práctica se realiza sin ninguna medida de conservación, por lo que se producen graves problemas de movimientos en masa y erosión superficial (Edeso et al., 1994). En el presente trabajo se evalúa la repercusión de estas técnicas de manejo en algunas de las propiedades físicas y químicas de los suelos. Esta información será de utilidad para predecir las consecuencias de estos manejos en la productividad y en la conservación de los suelos forestales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del ambiente de estudio. El presente trabajo fue realizado en diferentes explotaciones dedicadas a plantaciones de *Pinus*

radiata de Vizcaya y Guipúzcoa. La temperatura media anual entre los diferentes lugares varía entre 11 y 14 °C, mientras que la precipitación oscila entre 1200 y 1800 mm. El factor de erosividad de la lluvia de la USLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo), o factor R, varía entre 200 y 330 (ICONA, 1988). El régimen de los suelos en todos ellos es Údico, con un período corto de sequía en verano, y el de temperatura, Mésico. Todas las plantaciones se asientan sobre suelos de propiedades similares, desarrollados sobre argilitas (Albiense Superior-Cenomaniense Inferior). Las propiedades de los mismos fueron descritas en un trabajo anterior (Merino et al., 1991) y los datos sobre algunas propiedades de suelos originales, bajo plantación madura, se encuentran recogidas en las figuras 1 y 2. En forma resumida, los suelos están formados por un horizonte A ócrico y un B cámbico o gleico. Por encima de ellos se desarrolla un horizonte O, compuesto por capas L y F, que no supera los 30 mm de espesor. Se clasifican mayoritariamente como Cambisoles déstricos o gleicos. Como principales propiedades puede destacarse las texturas finas (desde arcillosa hasta franco limo arcilloso), la elevada densidad aparente, la baja conductividad hidráulica, que determina en ocasiones condiciones anaeróbicas temporales, los moderados-altos contenidos en materia orgánica en el horizonte A y el carácter fuertemente ácido. La micas, la caolinita y los óxidos de Fe son los minerales más abundantes de la fracción arcilla.

Diseño del experimento. Se seleccionaron un total de 58 parcelas, con superficie mínima de 0.5 ha⁻¹ y localizadas en pendientes superiores a 35 %. Veinticuatro de las mismas correspondieron a plantaciones maduras sin talar (denominadas P), el resto fueron plantaciones taladas a principios del año 1993 y en las que se habían practicado diferentes labores de preparación del terreno para la próxima plantación.

a) 15 de estas explotaciones presentaban un manejo de tipo convencional, en el que los restos de la tala se distribuyeron sobre la superficie del suelo. El tránsito de maquinaria pesada

fue escaso, con lo que apenas eran visibles alteraciones superficiales de los suelos (parcelas TC).

b) En 8 plantaciones se habían realizado tareas de preparación del terreno consistentes en la retirada de restos de tala, decapado del horizonte orgánico y extracción de tocones (parcelas TE).

c) En las 11 restantes, además de las labores anteriores, se practicó un arado profundo, de hasta 50 cm de profundidad ("arado de monte") a favor de la pendiente y sin ninguna medida de conservación (parcelas TES).

Toma de muestras y análisis. Las muestras de suelo fueron tomadas en agosto de 1993, 5-6 meses de la preparación del terreno y después de un período de intensas lluvias. En marzo de 1997 se recogieron nuevamente muestras en las mismas condiciones. En 1997 la toma de muestra no pudo ser repetida en las plantaciones maduras porque parte de ellas habían sido ya taladas. En cada sitio se seleccionaron al azar 9 puntos fuera de las zonas de extracción directa de troncos, en los que se tomó una muestra de suelo mineral de los 12 cm superficiales mediante el empleo de un cilindro de acero. Con las 9 tomas se confeccionaron 3 muestras compuestas. Las muestras fueron secadas al aire y tamizadas por 2 mm. Paralelamente, se tomaron 3 muestras para la determinación de densidad aparente, mediante el empleo de cilindros de acero (40 mm de longitud y 55 mm de diámetro interno), las cuales fueron secadas a 105 °C.

En 5 plantaciones bajo pinar maduro (TC) y en otras 4 parcelas de tipo TES, se seleccionaron 3 puntos al azar, en los que se practicó una calicata para la recogida de muestras a diferentes profundidades. En estas parcelas se calculó la reserva total de elementos en los suelos, utilizando los valores medios de los análisis químicos, la densidad aparente y el contenido de gravas.

En las muestras de suelo se analizó C, N y S totales con autoanalizador LECO. El pH se determinó en H₂O y KCl (0.1 M) con electrodo

de vidrio. Los cationes de cambio (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ y Al) fueron analizados mediante extracción con NH_4Cl al pH del suelo y medida con espectrofotometría de absorción o emisión atómica. El P disponible se determinó por el método de Olsen (en las muestras tomadas en 1993) o por el de Melich 3 (en 1997) y posterior colorimetría con molibdato amónico. La capacidad de intercambio catiónica efectiva (eCIC) se calculó mediante la suma de cationes básicos y Al . La saturación de bases fue estimada a partir de la eCIC.

Análisis estadísticos. Se realizaron análisis de correlación, de regresión y análisis de varianza (test de Tukey). Las diferencias en las medias de los diferentes parámetros para las muestras tomadas en las mismas parcelas en 1993 y 1997 fueron comprobadas mediante el test "t de muestras apareadas".

RESULTADOS

Pedregosidad, textura y densidad aparente. Ninguno de los manejos estudiados incrementó significativamente el contenido de gravas en la capa superficial del suelo. Tampoco se encontraron diferencias en el contenido de arcilla, limo o arena (datos nos mostrados).

El análisis de varianza reveló aumentos importantes de la densidad aparente después de las operaciones de tala y preparación del terreno (Fig. 1a). El efecto más intenso se observó en los suelos donde se realizó la retirada de restos orgánicos y arado profundo (TES), en los que la densidad aparente aumentó 17 % con respecto a los suelos bajo pinar maduro (P). Cuatro años más tarde estos suelos mantenían las elevadas densidades y en algunos se observaron valores de 1.7 g cm^{-3} . Además, muchos de ellos todavía mostraban un escaso desarrollo vegetal y algunos presentaban una costra superficial. El resto de los tratamientos (TC y TE) no presentaron aumentos significativos de la densidad aparente en el momento de las labores forestales. Sin embargo, 4 años más tarde la densidad aumentó

15 % en las parcelas taladas sin retirada de restos (TC) y 19 % en las que los restos fueron eliminados (TE).

Contenido en materia orgánica, nitrógeno y azufre. En comparación con las plantaciones de pinar (P), la capa superficial de los suelos sometidos a prácticas intensas forestales mostraron descensos considerables del contenido de materia orgánica (Fig. 1b). Después de la preparación del terreno (1993) en los suelos más alterados (TES) se detectaron pérdidas del 65 %, mientras que en los suelos con eliminación de restos (TE) esta reducción fue del 44 % ($p < 0.01$). Los contenidos de materia orgánica encontrados 4 años más tarde (1997) fueron similares a los del momento de las labores de preparación (Fig. 1b). Un ligero aumento fue detectado en los suelos TE, aunque éste no fue confirmado por el análisis de muestras apareadas.

En 1993, el contenido medio de N total en los suelos arados (TES) fue 65 % más bajo que los suelos bajo plantación o con manejo convencional (TC) ($p < 0.01$) (Fig. 1c). En las zonas con retirada de restos (TE) la reducción de N fue también importante y supuso la pérdida del 30 % de su contenido original ($p < 0.01$). Cuatro años más tarde los contenidos de N fueron similares a los del momento de la preparación del terreno. En los suelos arados (TES) y en los de manejo convencional (TC) se encontraron pérdidas adicionales, aunque éstas no fueron confirmadas por el análisis estadístico.

El contenido de S total en los suelos sin laboreo (TC) se mantuvo similar al de las plantaciones sin talar (P). Los suelos con labores intensas de preparación experimentaron reducciones de 39 % (TES) y 15 % (TE) con respecto a los suelos iniciales (Fig. 1d). En 1997 los contenidos de S disminuyeron ligeramente en todos los casos con respecto a los de 1993.

En el momento de la preparación del terreno, en 1993, el P disponible, analizado por el método Olsen, reveló valores inferiores a 1 mg kg^{-1} en todos los tipos de manejo (no mostrado). En 1997 el contenido de P disponible, analizado por el método Mehlich 3, fue muy bajo, siempre

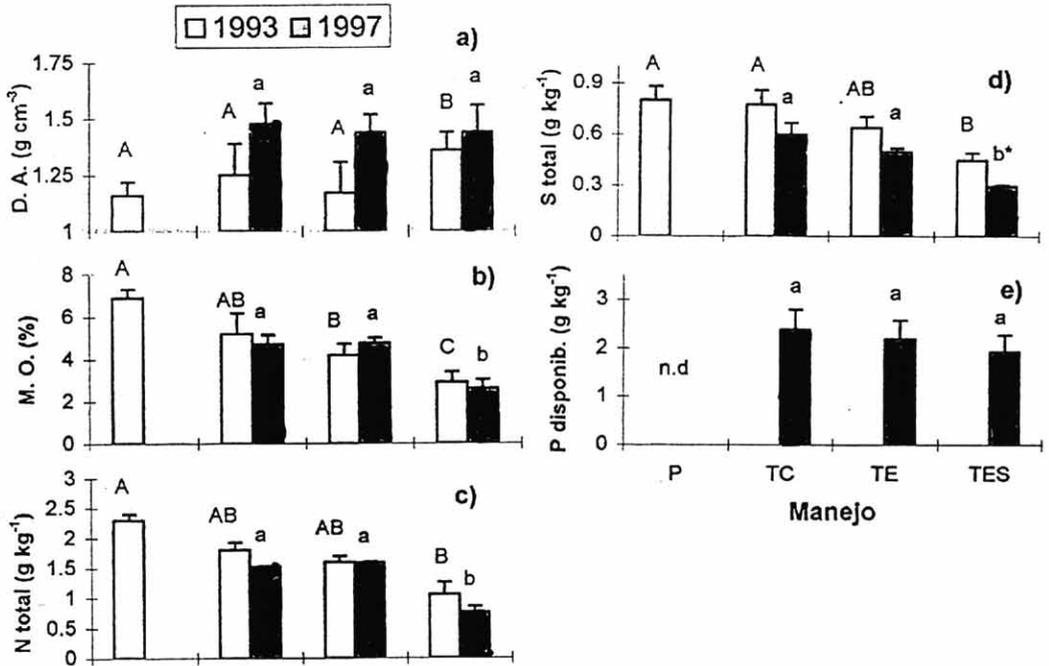


Figura 1. Densidad aparente y contenido de materia orgánica, N y S totales y P disponible en las capas superficiales de los suelos bajo plantación madura (P) y en las parcelas taladas donde se realizaron diferentes tratamientos de preparación del terreno (TC, TE y TES, ver el texto). Letras diferentes indican diferencias significativas al nivel de $p < 0.01$. A-B-C es la comparación de las parcelas en 1993 y a-b-c, la comparación en 1997 (test de Tukey). * indica diferencias significativas entre los valores medios de 1993 y 1997 (test t de muestras apareadas).

por debajo de 4 mg kg^{-1} (Fig. 1e). El empleo de este método, sin embargo, reveló ligeras reducciones de P disponible en los suelos con laboreo (TES).

Acidez y cationes de cambio. Ninguno de los manejos forestales modificó significativamente el valor de pH, medido en H_2O o KCl. Sin embargo, los tratamientos TC y TES presentaron valores medios inferiores a los de las plantaciones maduras (Fig. 2a). En 1997 todos los suelos mostraron pH superiores a los de 1993, e incluso a los de plantaciones sin talar (P).

Todos los manejos silvícolas redujeron el contenido de Ca^{2+} de cambio. Este efecto fue más notorio en los tratamientos con retirada de restos orgánicos (TE y TES), en los que se

registraron pérdidas medias de 60 (TE) y 80 % (TES), respectivamente ($p < 0.01$) (Fig. 2b). Cuatro años más tarde, los contenidos de este elemento se mantenían en los mismos niveles a los encontrados en el momento de la preparación del terreno.

El contenido de Mg^{2+} de cambio también se redujo considerablemente después de las labores forestales, aunque sólo fueron significativos los decensos encontrados en las parcelas TE, en donde se registraron pérdidas del 67 % con respecto a los suelos bajo plantación madura (Fig. 2c). En 1997 los únicos cambios detectados fueron los aumentos de Mg^{2+} en las parcelas de extracción de restos sin arado (TE). Los tratamientos no tuvieron ningún efecto inme-

diato sobre el contenido de K^+ de cambio (Fig. 2d). Sin embargo, durante los cuatro años posteriores los suelos con manejo convencional (TC) o los de retirada de restos sin arado (TE) incrementaron su contenido en este elemento y presentaron niveles superiores a los de las plantaciones maduras.

En el momento de su realización ninguno de los tratamientos forestales repercutió significativamente en el contenido de Al intercambiable (Fig. 2e). No obstante, después de la tala todos los suelos mostraban valores medios de Al superiores a los de las plantaciones maduras. Coincidiendo con el incremento de pH, los contenidos de Al de cambio descendieron du-

rante los cuatro años posteriores en todos los tratamientos, aunque esto último solo resultó significativo en el tratamiento TES.

La capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) de la capa superficial del suelo fue reducida ligeramente durante las labores silvícolas. Las diferencias entre los distintos manejos estudiados, sin embargo, no resultaron significativas. Durante los 4 años siguientes tuvo lugar una ligera disminución de CICE en los suelos más alterados (TES). Como consecuencia de los descensos de Ca^{2+} y Mg^{2+} y aumentos de Al, las saturaciones de cationes básicos se redujeron en los tratamientos TE (60 %) y TES (39 %), aunque sólo en este último

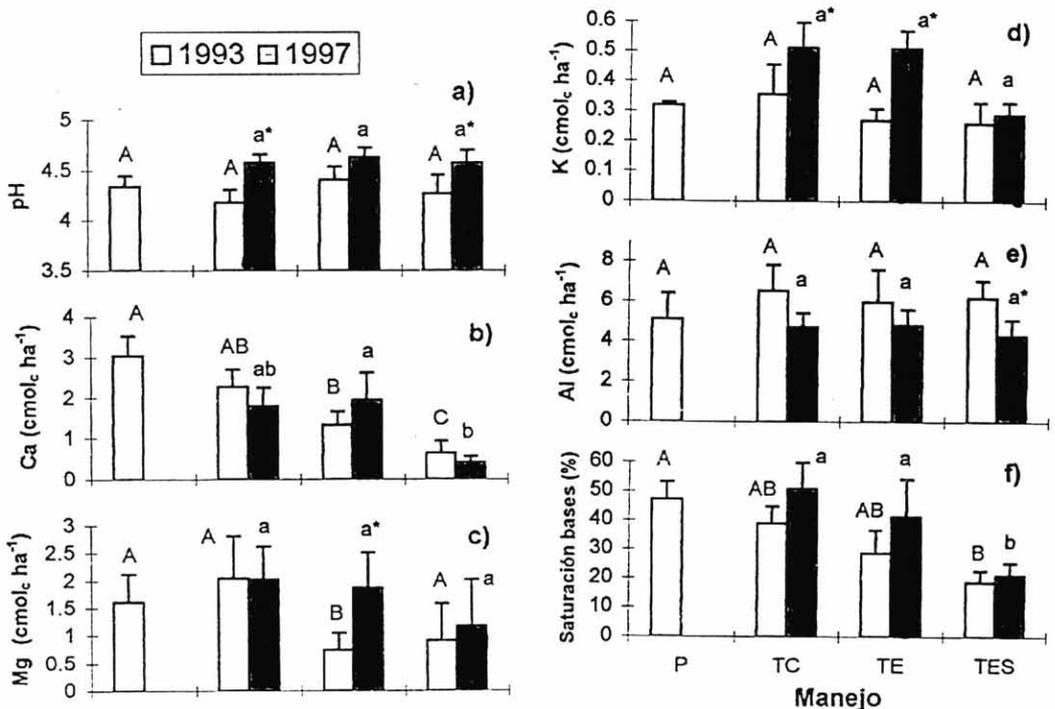


Figura 2. pH, contenido de cationes de cambio en las capas superficiales de los suelos bajo plantación madura (P) y en las parcelas taladas donde se realizaron diferentes tratamientos de preparación del terreno (TC, TE y TES, ver el texto). Letras diferentes indican diferencias significativas al nivel de $p < 0.01$. A-B-C es la comparación de las parcelas en 1993 y a-b-c, la comparación en 1997 (test de Tukey). * indica diferencias significativas entre los valores medios de 1993 y 1997 (test t de muestras apareadas).

tratamiento el efecto resultó significativo (Fig. 2f). Los incrementos de K^+ y Mg^{2+} en los tratamientos TC y TE durante los 4 años posteriores derivaron en mayores saturaciones de bases.

DISCUSIÓN

Modificaciones de las propiedades del suelo, recuperación y procesos implicados

Las labores intensivas de preparación del terreno aumentaron los niveles de densidad aparente en la profundidad de enraizamiento de los suelos. En las parcelas donde las tareas fueron más intensas el incremento de la densidad aparente se produjo por el tránsito de maquinaria pesada. No obstante, parte del mismo pudo ser debido a la aparición en superficie de material del horizonte subsuperficial, con menor contenido en materia orgánica y más denso. La correlación negativa entre la densidad aparente y el contenido de materia orgánica ($r = -0.49$, $p < 0.01$) refleja este efecto. El incremento de densidad aparente durante los 4 años siguientes a la tala en las parcelas con labores menos intensas pudo ser debido al asentamiento del terreno y al impacto de las gotas de lluvia. Aumentos de densidad aparente después de la tala, producidos por el paso de maquinaria pesada y alteraciones de los suelos durante las labores forestales han sido descritos en otras áreas (Miller y Sirois, 1986; Johnson et al., 1991).

Los resultados del presente trabajo muestran que la recuperación de la densidad aparente durante los 4 años siguientes a las labores fue nula, y confirman que los efectos de las técnicas de preparación del terreno sobre la compactación pueden mantenerse durante un prolongado período de tiempo (Froehlich et al., 1985; Madeira, 1989). Según diferentes investigadores (Froehlich et al., 1985; Tuttle et al., 1985) la recuperación de este parámetro está condicionada por algunas propiedades del suelo, como la textura y el contenido en materia orgánica, así como por las condiciones de humedad en el momento del laboreo.

Reducciones en los contenidos de materia orgánica y nutrientes similares a los observados en este estudio se han observado también en otras áreas. De este modo, descensos en materia orgánica (Miller y Sirois, 1986; Johnson et al., 1991), N (Adams y Boyle, 1982; Mroz et al., 1985, Smith et al., 1994), Ca^{2+} de cambio y P asimilable (Mroz et al., 1985, Miller y Sirois, 1986; Tuttle et al., 1985) han sido descritos después de labores intensivas de preparación del terreno. Los descensos del contenido de materia orgánica y nutrientes después de la preparación del terreno son atribuidos a la alteración física de horizontes, así como a las pérdidas por erosión o lixiviado.

En la Tabla 1 se recogen las reservas totales de materia orgánica y nutrientes en suelos bajo plantaciones maduras y en plantaciones taladas en las que 5-6 meses antes se practicaron labores de retirada de restos orgánicos y arado de monte (parcelas TES). La comparación de las reservas de elementos entre ambos tipos de parcelas permitiría determinar en qué medida los descensos de materia orgánica y nutrientes de la capa superficial del suelo fueron causados por pérdidas netas o, si por el contrario, se debieron a la redistribución de material de horizontes superficiales y subsuperficiales producida por el arado profundo. Los datos de la Tabla 1 revelan descensos importantes de la reserva total de materia orgánica, N y S en los suelos TES, mientras que las diferencias para el resto de elementos fueron escasas. Sin embargo, debido a la elevada variabilidad encontrada en ambos tipos de parcelas, ninguna de las diferencias resultó significativa. Estos resultados, aunque no concluyentes, sugieren que los descensos de materia orgánica y nutrientes de la capa superficial no fueron debidos a pérdidas netas, sino que mayoritariamente tuvieron lugar como consecuencia del efecto de mezcla entre horizontes.

No obstante, puesto que la toma de muestra fue realizada 5-6 meses después de la preparación del terreno y con posterioridad a un período de intensa precipitación, importantes pérdi-

Tabla 1. Reserva de materia orgánica y nutrientes en los suelos ($\text{kmol}_c \text{ha}^{-1}$) bajo plantación de pinos maduros y suelos donde se realizaron tareas de preparación del terreno consistentes en extracción de restos de tala y arado de monte (TES). El error standard se incluye en paréntesis.

| | C | N | S | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ | K ⁺ | Al |
|--------------------|--------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|------------------|
| Pinar ¹ | 8737.1 (1887.6) | 598.4 (112.1) | 399.6 (99.6) | 33.1 (7.1) | 15.9 (3.6) | 4.0 (1.0) | 11.7 (1.8) | 354.4 (107.6) |
| TES ² | 8259.8 (2406.5) | 461.6 (136.7) | 187.1 (25.5) | 35.2 (8.7) | 16.2 (4.9) | 11.0 (1.1) | 10.1 (1.5) | 395.2 (66.0) |
| Pinar-TES | 478.1 (1469.8) | 136.8 (84.8) | 212.5 (46.3) | -2.1 (5.4) | -0.3 (2.9) | -7.0 (0.7) | 1.6 (1.1) | -40.8 (58.3) |

¹, n= 5; ², n= 4

das de elementos pudieron también ocurrir mediante erosión y lixiviado. De este modo, diferentes estudios muestran que durante los primeros años después de las labores de tala y preparación del terreno las pérdidas de nutrientes mediante erosión (Farrish et al., 1993) y en disolución (Clayton y Kennedy, 1985; Neal et al., 1992) pueden ser considerables. En el presente estudio, el seguimiento de la erosión mediante el empleo de colectores Gerlach reveló pérdidas de suelo muy importantes durante los 9 primeros meses después de las labores silvícolas, en los que se registraron pérdidas medias de suelo de 20, 33 y 68 t ha⁻¹ en las parcelas TC, TE y TES, respectivamente (Edeso et al., 1994). Por otro lado, parte de la reducción de materia orgánica también pudo ocurrir como resultado de una mayor tasa de descomposición, que implicaría pérdidas por CO₂ y de C orgánico disuelto. El proceso de descomposición es favorecido substancialmente después de la tala debido a las mayores temperaturas, al incidir directamente la radiación solar, y humedad del suelo, como consecuencia de la retirada de la vegetación (Convington, 1981; Hendrikson et al., 1989). El incremento de las emisiones de CO₂ después de diferentes labores de manejo ha sido constatado en un reciente experimento (Pérez-Batallón et al., 1997), que revela grandes diferencias en la emisión de CO₂ entre los diferentes tratamientos forestales.

Las bajas tasas de recuperación del contenido de materia orgánica durante los 4 años posteriores a la preparación del terreno se debieron posiblemente al menor aporte de hojarasca sobre la superficie del suelo y, en el caso de los suelos más alterados, al escaso desarrollo de vegetación baja. En otros estudios también se ha observado escasa restitución de materia orgánica durante los años posteriores a alteraciones del suelo por labores forestales intensas (Tuttle et al., 1985; Madeira, 1989).

Las mayores temperaturas y la humedad del suelo potenciaron posiblemente los procesos de mineralización de N, por lo que la pérdida de NO₃⁻ en disolución pudo contribuir substancialmente a la reducción del contenido de N total durante los primeros meses después de la tala (Vitousek y Matson, 1985; Smith et al., 1994). Este proceso pudo ser especialmente importante en los suelos con intenso laboreo, en los que el desarrollo vegetal, capaz de asimilar buena parte del N mineral, fue escaso. Un estudio paralelo realizado en la región (Merino et al., 1995) ha confirmado las elevadas concentraciones de NO₃⁻ en las disoluciones de suelos con posterioridad a la deforestación. Por otro lado, pérdidas adicionales de N₂O y N₂ originadas por desnitrificación pueden también tener lugar después de la tala (Robertson et al., 1987; Brumme, 1995). En los suelos estudiados, el proceso de desnitrificación estaría favorecido por las condiciones

anaeróbicas temporales y los mayores contenidos de NO_3^- . De este modo, en un reciente trabajo, Estavillo et al. (1994) han registrado pérdidas importantes de N por desnitrificación en estos suelos. Cuatro años después de las labores de preparación del terreno los suelos más alterados no recuperaron los contenidos de N, por el contrario, éstos se redujeron. Posiblemente este efecto se debió a pérdidas posteriores a través de la disolución o de la atmósfera. Coincidiendo con estos resultados, en otras áreas también se han encontrado bajas tasa de recuperación de N después de intensas labores silvícolas (Mroz et al., 1985; Tuttle et al., 1985).

Los contenidos de S total también disminuyeron después de las labores de preparación del terreno. Las pérdidas de este elemento por disolución no parecen probables durante los primeros meses después de la tala porque la acidificación producida por la mayor nitrificación potencia la adsorción SO_4^{2-} en el suelo (Fuller et al., 1985). Por consiguiente, la pérdida de S total observada después de la preparación del terreno, en 1993, se debió a una redistribución de S a lo largo del perfil. No obstante, los descensos de S total registrados 4 años más tarde no pueden ser atribuidos al efecto de mezcla entre horizontes. Estos descensos coincidieron con importantes incrementos de pH, lo que sugiere que éstos pudieron ocurrir a través de pérdidas por lixiviado de SO_4^{2-} , debido a un descenso de la capacidad de adsorción del suelo. Un comportamiento similar ha sido sugerido por Krake y Fernández (1993), a través del estudio de disolución del suelo.

La reducción de la CIC efectiva encontrada en el momento de las labores silvícolas tuvo lugar simultáneamente a la del contenido en materia orgánica. El descenso de este parámetro durante los siguientes 4 años en los suelos con intensa preparación responderían a las pérdidas adicionales de materia orgánica que ocurrieron durante ese tiempo.

Los menores valores de saturación de bases y pH (este último no significativo) muestran que los suelos sometidos a prácticas intensas de

laboreo experimentaron un proceso de acidificación durante los primeros meses después de los tratamientos. Este efecto ha sido también observado en otras áreas y es atribuido a un aumento de la tasa de nitrificación después de la deforestación (Vitousek y Matson, 1985; Staaf y Olsson, 1991). Los incrementos de pH observados 4 años más tarde serían debidos a la liberación de cationes solubles y de grupos OH^- como consecuencia de la mayor descomposición de residuos de tala (tratamiento TC) y materia orgánica (tratamiento TE) en respuesta a las mayores temperaturas del suelo, tal como se ha sido sugerido en otros estudios (Snyder y Harter, 1984; Hendrikson et al., 1985; Krake y Fernández, 1993).

En los diferentes manejos es evidente una diferente evolución del contenido de cationes de cambio durante los 4 años siguientes a la tala. Estas diferencias reflejan la influencia de la materia orgánica y de los restos vegetales para reponer los nutrientes. De este modo, los incrementos de K^+ observados en los suelos de manejo convencional o en los que la materia orgánica no fue retirada de la superficie (suelos TE), efecto observado también por otros investigadores (Snyder y Harter, 1985; Mroz et al., 1985; Olsson et al., 1996), responderían a la pronta liberación de este elemento durante las fases iniciales de descomposición (Cortina y Vallejo, 1994). A pesar del elevado contenido en Ca^{2+} y Mg^{2+} de los restos vegetales de estas plantaciones (Barraqueta y Basagoiti, 1993), no se observó ninguna modificación en el contenido de cambio de estos elementos, ni siquiera en las plantaciones donde los restos de tala no fueron retirados (TC). Esta escasa respuesta posiblemente esté relacionada con la baja tasa de liberación de estos elementos durante los primeros años con posterioridad a la deforestación (Cortina y Vallejo, 1994).

Repercusión de las técnicas de manejo sobre la productividad forestal y la conservación del suelo

El aumento de la compactación del suelo afecta negativamente a la estructura y la porosi-

dad, por lo que éste puede derivar en una reducción importante de la aireación (Froehlich, 1979). Los elevados valores de densidad aparente encontrados en los suelos más alterados, superiores a 1.35 g cm^{-3} , y en algunos casos a 1.7 g cm^{-3} , pueden reducir la capacidad de éstos para la regeneración vegetal y dificultar el establecimiento de la próxima rotación (Froehlich, 1979; Rab, 1996). Por otra parte, la compactación del suelo implica reducciones considerables de la conductividad hidráulica, lo que incrementa el potencial para la erosión como consecuencia de la mayor escorrentía (Edeso et al., 1994).

Puesto que la materia orgánica está directamente implicada en la formación de agregados resistentes a la erosión, la pérdida de ésta lleva asociada una mayor susceptibilidad del suelo frente a procesos erosivos. En el presente trabajo este punto es confirmado por los mayores valores en el factor K de la USLE encontrados en los suelos con intenso laboreo (0.35 ± 0.05), en comparación a los de manejo convencional (0.27 ± 0.04) ($p < 0.05$, Edeso et al., 1994). Estos datos confirman que los mayores tasas de erosión, anteriormente señaladas, no sólo fueron causadas por la retirada de la vegetación protectora sino que también como consecuencia de modificaciones en las propiedades de los suelos.

Los resultados de este trabajo muestran que los tratamientos forestales intensivos en los que se practica la retirada de restos de tala y del horizonte orgánico reducen en la zona de enraizamiento del suelo el contenido de algunos nutrientes esenciales para el desarrollo vegetal durante un prolongado período de tiempo. En 1997, varias de las plantaciones sometidas a tratamientos intensivos manifestaban síntomas de clorosis y pérdida de acículas, así como crecimientos reducidos, que coincidían con niveles deficientes de N, P y Mg^{2+} en acículas (Edeso y Merino, trabajo en elaboración). Es muy probable que estas alteraciones del crecimiento radiquen en las modificaciones de propiedades físicas y contenido de nutrientes en los suelos, tal como ha sido descrito por otros investigadores (Smith et al., 1994; Munson et al., 1993).

Barraqueta y Basagoiti (1993) han determinado el contenido de nutrientes presentes en el horizonte orgánico y parte área en plantaciones de pino radiata en la región. Según los datos de estos autores y teniendo en cuenta la reserva de elementos en los horizontes minerales de estos suelos (Tabla 1), la retirada de componentes orgánicos implica la pérdida del 7 % de N, 35 % de Ca^{2+} , 22 % de Mg^{2+} y 33 % de K^+ de estos sistemas forestales. Por consiguiente, en los suelos con manejo convencional la descomposición de restos de tala y del horizonte orgánico pueden restituir los elementos extraídos durante la rotación. Si se considera el bajo contenido de minerales alterables en estos suelos, el proceso de aporte de nutrientes por este proceso puede ser esencial para mantener el nivel de fertilidad de los mismos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dra. Socorro Seoane, a Susana Fernández y a José Antonio Larrión, la ayuda prestada durante la elaboración del trabajo. El estudio fue realizado con la financiación de la Consejería de Urbanismo, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco.

BIBLIOGRAFIA

- Adams, P. W.; Boyle, J. R. (1982). Soil fertility changes following clearcut and whole-tree harvesting and burning in Central Michigan. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46, 638-640.
- Barraqueta, P.; Basagoiti, M. (1993). Acumulación de la hojarasca y de los nutrientes en repoblaciones de *Pinus radiata* en el País Vasco. En: Actas del I Congreso Forestal Español, tomo I, 295-300.
- Brumme, R. (1995). Mechanisms for carbon and nutrients release and retention in beech forest gaps. III. Environmental regulation of soil respiration and nitrous oxide emissions along a microclimatic gradient. *Plant and Soil*, 168-169, 593-600.

- Clayton, J. L.; Kennedy, D. A. (1985). Nutrient losses from timber harvest in the Idaho Batholic. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49, 1041-1049.
- Cortina, J. y Vallejo, V. R. (1994). Effects of clearfelling on forest floor accumulation and litter decomposition in a radiata pine plantation. *For. Ecol. Manage.*, 70, 299-310.
- Covington, W. W. (1981). Changes in forest floor organic matter and nutrient content following clear cutting in northern hardwoods. *Ecology*, 62, 41-48.
- Edeso, J. M., González, M. J., Merino, A., Marauri, P.; Larrión, J. A. (1994). Primeros datos sobre las pérdidas de suelo en explotaciones forestales en la vertiente cantábrica del País Vasco, 21-30. En: J. M. García Ruiz; T. Lasanta (Editores), *Efectos Geomorfológicos del Abandono de Tierras*. Sociedad Española de Geomorfología, Zaragoza.
- Estavillo, J. M., Rodriguez, M. Domingo, M. Muñoz-Rueda, A.; Gonzalez-Murua, C. (1994). Denitrification losses from natural grassland in the Basque Country under organic and inorganic fertilization. *Plant and Soil*, 162, 19-29.
- Farrish, K. W., Adams, J. C.; Thompson, C. V. (1993). Soil conservation practices on clearcut forestlands in Louisiana. *J. Soil and Water Cons.*, 48, 136-139.
- Froehlich, H. A. (1979). Soil compaction from logging equipment: effects on growth of young ponderosa pine. *J. Soil Water Conserv.*, 34, 276-278.
- Froehlich, H. A., Miles, D. W. R.; Robbins, R. W. (1985). Soil bulk density on compacted skid trails in Central Idaho. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49, 1015-1017.
- Fuller, R. D., David, M. B.; Driscoll, C. T. (1985). Sulfate adsorption relationships in forested spodosols of the Northeastern USA. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49, 1034-1040.
- Hendrickson, O. Q., Chatarpaul, L.; Burgess, D. (1989). Nutrient cycling following whole-tree and conventional harvest in northern mixed forest. *Can. J. For. Res.*, 19, 725-735.
- ICONA; INTECSA (1988). *Agresividad de la lluvia en España*. ICONA, Madrid.
- Johnson, C. E., Johnson, A. H., Huntington, T. G.; Siccama, T. G. (1991). Whole-tree clear-cutting effects on soil horizons and organic-matter pools. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55, 497-502.
- Krake, C. R.; Fernández, I. J. (1993). Biogeochemical responses of a forested watershed to both clearcut harvesting and papermill sludge application. *J. Environ. Qual.*, 22, 776-786.
- Madeira, M. A. V. (1989). Changes in soil properties under eucaliptus plantations in Portugal, 81-99. En Perera, J. S.; Landsberg, J. J. (Editores), *Biomass Production by Fast-Growing Trees*, Kluwer Academic Publishers, Amsterdam.
- Merino, A., Azbitarte, I.; Larumbe, I. (1995). Influence of the characteristics of soils and their management on the quality of the waters of Añarbe's reservoir (N Spain), 86-88. En *European Society Soil Conservation (Editor), Proceedings of the Meeting on The Soil as Strategic Resource: Degradation Processes and Conservation Measures*. Tenerife.
- Merino, A.; Gey, M. P.; Martínez Cortizas, A. (1991). Propiedades de los suelos desarrollados sobre argilitas de Guipúzcoa. *Munibe*, 43, 73-83.
- Miller, J.; Sirois, D. L. (1986). Soil disturbance by skyline yarding vs. skidding in a loamy hill forest. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50, 1579-1583.
- Mroz, G. D., Jurgensen, M. F.; Frederick, D. J. (1985). Soil nutrient changes following whole tree harvesting on three northern hardwood sites. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49, 1552-1557.
- Munson, A. D.; Margolis, H. A.; Brand, D. (1993). Intensive silvicultural treatment: impacts on soil fertility and planted conifer response. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57, 246-255.

- Neal, C., Reynolds, B., Smith, C. J., Hill, S., Neal, M., Conway, T., Ryland, G. P., Jeffrey, H., Robson, A. J.; Fisher, R. (1992). The impact of conifer harvesting on stream water pH, alkalinity and aluminium concentrations for the British uplands: an example for an acidic and acid sensitive catchment in mid-Wales. *The Sci. Total. Environ.*, 126, 75-87.
- Olsson, B. A., Bengtsson, J.; Lundkvist, H. (1996a). Effects of different forest harvest intensities on the pools of exchangeable cations in coniferous forest soils. *For. Ecol. Manag.*, 84, 135-147.
- Olsson, B. A., Staaf, H., Lundkvist, H., Bengtsson, J.; Rosén, K. (1996b). Carbon and nitrogen in coniferous forest soils after clear-felling and harvest of different intensity. *For. Ecol. Manag.*, 82, 19-32.
- Pérez-Batallón, P.; Merino, A.; Macías, F. (1997). Soil CO₂ emissions and microbial biomass following tree cutting and different logging rest managements. *Comunicación enviada al 16 Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo, a celebraren Montpellier, en 1998.*
- Rab, M. A. (1996). Soil physical and hydrological properties following logging and slash burning in the *Eucalyptus regnans* forest of southeastern Australia. *For. Ecol. Manag.*, 84, 159-176.
- Robertson, G. P.; Vitousek, P. M.; Matson, P. A.; Tiedje, J. M. (1987). Denitrification in a clearcut Loblolly pine (*Pinus taeda*, L.) plantation in the southeastern US. *Plant and Soil*, 97, 119-129.
- Smith, C. T., Dyck, W. J., Beets, P. N., Hodgkiss, P. D.; Lowe, A. T. (1994). Nutrition and productivity of *Pinus radiata* following harvest disturbance and fertilization of coastal sand dunes. *For. Ecol. Manag.* 66, 5-38.
- Snyder, K. E., Harter, R. D. (1984). Changes in solum chemistry following clearcutting of northern hardwood stands. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48, 223-228.
- Staaf, H.; Olsson, B. A. (1991). Acidity in four coniferous forest soils after different harvesting regimes of logging slash. *Scand. J. For. Res.*, 6, 19-29.
- Tuttle, C. L. Golden, M. S.; Meldahl, R. S. (1985). Surface soil removal and herbicide treatment: effects on soil properties and Loblolly pine early growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49, 1558-1562.
- Vitousek, P. M.; Matson, P. A. (1985). Disturbance, nitrogen availability and nitrogen losses in an intensively managed loblolly pine plantation. *Ecology*, 66, 1360-1376.
- Waring, R. H.; Schlesinger, W. H. (1985). *Forest Ecosystems*. Academic Press, Orlando, Florida.