

Suelos mineros asociados a la minería de carbón a cielo abierto en España: una revisión

J. C. Arranz-González

Departamento de Investigación en Recursos Geológicos, Instituto Geológico y Minero de España. Ríos Rosas, 23, 28003 Madrid, España, jc.arranz@igme.es

RESUMEN

Las situaciones que pueden encontrarse con posterioridad a la extracción minera abarcan desde el simple abandono de huecos y escombreras hasta la construcción de suelos artificiales sobre una topografía conformada, utilizando capas de suelo, rocas excavadas, o ambos tipos de materiales. Los suelos de este tipo han sido denominados suelos mineros. De ellos, los generados por la minería de carbón han sido los más extensamente estudiados, tanto para evaluar el potencial de rehabilitación, como para aprender cómo evoluciona la edafogénesis. Esto es cierto también para España. En estas páginas se presenta una revisión de los principales trabajos dedicados a este tema. Se ha visto que, como ocurre en otros países, es evidente que las propiedades físicas y químicas de estos suelos antrópicos están cambiando velozmente, y que los perfiles de suelos mineros descritos pueden ser considerados suelos muy jóvenes, que muestran un desarrollo incipiente pero rápido. Se ha comprobado que el análisis de la información obtenida a partir de parámetros edáficos de muestras superficiales y su interpretación, es de gran utilidad práctica en procesos de rehabilitación. Sin embargo, se ha mostrado de mucho mayor interés la descripción y toma de muestras de perfiles de suelos, lo que ha permitido comprender mejor los procesos internos y reconocer propiedades que son exclusivas de este tipo de suelos de origen antrópico.

Palabras clave: España, minería de carbón, rehabilitación, suelos mineros, tecnosoles

Mine soils associated with open-cast coal mining in Spain: a review

ABSTRACT

The different situations that may be found after the closure of coal mines range from the simple abandonment of pits and spoil tips to areas where reclamation work has led to the creation of artificial soils on a reconstituted surface composed of layers of rock and soil or both types of material. Soils of this type are known as mine soils, amongst which those generated by coal mining have been studied most extensively, both to assess their potential for reclamation and to learn more about their pedogenetic evolution. We present here a review of some of the more important works devoted to this subject. We have found evidence to show that in Spain, just as in other countries, the physical and chemical properties of these anthropogenic soils are changing rapidly and so the mine-soil profiles described can be considered as belonging to very young soils still undergoing incipient but rapid development. We have also found that an analysis of information obtained from the soil parameters of surface samples and its interpretation is of great practical use in restoration processes. Nevertheless, the sampling and description of soil profiles has proved to be of much greater interest, allowing us to reach a clearer understanding of the internal processes and properties that are unique to these types of anthropogenic soil.

Key words: coal mining, mine soils, restoration, Spain, technosols

Introducción

Las diferentes operaciones llevadas a cabo durante la explotación minera a cielo abierto determinan la presencia de elementos más o menos discernibles en el terreno alterado, como pueden ser: escombreras (vacíos, botaderos), balsas de finos, huecos (tajos), o frentes abandonados. En algunos lugares, estas nuevas superficies han sido colonizadas por la vegetación de forma natural o han sido revegetados, iniciándose un proceso de formación de suelo, pero en muchos otros los problemas de carácter edáfico existentes pueden restringir el establecimiento de la

vegetación durante mucho tiempo o impedirlo totalmente. En las escombreras en las que no se han realizado labores de rehabilitación, el posible medio de enraizamiento procede de la mezcla de capas profundas, siendo lo más corriente que los suelos originales se hayan perdido, normalmente sepultados por los estériles mineros cuyo volumen es muy superior. Sin embargo, actualmente, la mayoría de los trabajos de rehabilitación realizados sobre terrenos mineros parten de la reposición de materiales edáficos preservados o importados sobre las zonas desnudas o cubiertas de estériles, previa remodelación topográfica.

La mayoría de estos terrenos presentan en superficie materiales sueltos, los cuales suelen estar dominados por elementos gruesos, aunque incluyen también finos, y pueden ser considerados materiales tipo suelo, al menos en un sentido amplio: material mineral fragmentado, compuesto de partículas de muy variados tamaños, más o menos móviles, que encierran una cantidad variable de agua, aire, materia orgánica y otras sustancias (Spangler y Handy, 1982). Estos suelos antrópicos, que en terminología anglosajona han sido denominados *minesoils* (suelos mineros o de mina), han sido creados, ya sea de forma casual, improvisada o rigurosamente planificada, mediante el vertido o extendido en la superficie de materiales geológicos fragmentados o no consolidados, capas de suelo, o ambos. Esta forma de ver las cosas es coherente con la definición de suelo adoptada por *Soil Survey Division Staff* (1993): suelo es el colectivo de cuerpos naturales de la superficie terrestre, en lugares modificados o, incluso, creados por el hombre a partir de materiales terrosos, que contienen materia viva, y soportan o son capaces de sustentar vegetación.

La minería de carbón a cielo abierto es el tipo de minería que más se ha prestado a ser considerada bajo este tipo de enfoque, existiendo destacados trabajos que pueden calificarse como precursores (Sencindiver *et al.*, 1978; Smith y Sobek, 1978; Ammons, 1979; Schafer *et al.*, 1979; Smith *et al.*, 1981). En España, también se han desarrollado estudios que utilizan el concepto de suelo minero y se sirven de los métodos empleados por la ciencia del suelo para conocer y comprender sus limitaciones o su potencial productivo, con el apoyo, a veces, de otras disciplinas (geoquímica ambiental sobre todo), ocurriendo igualmente que la mayoría de los casos se refieren a minería de carbón. El objetivo de este trabajo es efectuar una revisión de la literatura existente sobre esta temática en nuestro país, complementada y apoyada con la publicación de algunos datos inéditos guardados en el fondo documental del IGME.

Propiedades físicas

Contenido en elementos gruesos y textura

Los materiales de tamaño superior a los 2 mm de diámetro, que se encuentran embebidos en la masa de suelo, son los llamados elementos gruesos o fragmentos rocosos. Al menos inicialmente, el tamaño y cantidad de los fragmentos presentes depende de los materiales geológicos de recubrimiento y de las capas intercaladas con el carbón, de los procesos de

extracción en los frentes de explotación y de la manipulación (transporte y vertido o extendido de los estériles). Pedersen *et al.* (1980) describieron perfiles de suelos mineros con contenidos en elementos gruesos normalmente entre el 70 y el 80%, llegando en algún caso a superar el 90%. En principio, esta circunstancia debería considerarse un inconveniente para el desarrollo vegetal, sobre todo por la menor capacidad de retención de agua. Sin embargo, Limstrom (1960) observó que una pequeña cantidad de tierra fina (alrededor de 20%) es suficiente para la reforestación de terrenos mineros. Para Ashby y Vogel (1994), la existencia de elementos gruesos es beneficiosa en los suelos y estériles mineros con vistas a la plantación de especies de árboles forestales, advirtiendo que determinados estériles con tan sólo un 20% de finos pueden proporcionar una buena supervivencia y crecimiento de árboles y arbustos, y con un 25 a 50% han demostrado capacidad para soportar buenos crecimientos de especies forrajeras. Por otro lado, Schafer *et al.* (1979) mostraron que en suelos mineros con cincuenta años de antigüedad la mayoría de los elementos gruesos superficiales ha desaparecido y los que restan tienden a ser pequeños (2-5mm de diámetro), debido a una mayor actividad de los procesos de alteración física y química.

En la escombrera de Lignitos de Meirama, los estériles de la mina se fueron depositando mezclados en diferentes proporciones, lo que dio lugar a una cierta variabilidad superficial. Aún así, se han descrito rangos de 30 a 40% de contenido en elementos gruesos (Seoane-Labandeira *et al.*, 1995). Los valores de porcentaje de elementos gruesos, medidos en 14 escombreras de carbón de la provincia de León (situadas en Piedrafita de Babia y Valdesamario), oscilaron entre el 68 y el 86% (IGME, 2003). También, el contenido en elementos gruesos superó siempre el 60%, llegando a rondar el 78% en las capas superficiales de áreas en proceso de rehabilitación en Valdesamario (León), dominando los fragmentos de areniscas y lutitas, a veces con carbón.

Ammons (1979) describió cómo algunos elementos gruesos se alteraban rápidamente y otros eran capaces de ceder agua a las raíces. Se ha señalado también que ciertos tipos de fragmentos rocosos en proceso de alteración pueden contener nutrientes utilizables en grado mayor que el que se da en los finos del suelo (Ashby *et al.*, 1984). Se ha observado que, con frecuencia, las raíces se afelpan alrededor de un fragmento rocoso para expandirse después entre los elementos gruesos pequeños y los finos (Ammons, 1979; Smith y Sobek, 1978; Arranz-González, 2006; Arranz-González, 2007). Este fenómeno puede incrementar la extensión y utilización de los recursos de

suelo por parte de las raíces. También, en horizontes profundos, los elementos gruesos suelen estar desordenados, presentando a veces bordes afilados o astillados. En algunas ocasiones, es posible encontrar fragmentos rocosos que forman un puente entre otros dos, dejando por debajo de ellos un espacio vacío no relleno por tierra fina (Ammons, 1979; Smith y Sobek, 1978; Arranz-González, 2006; Arranz-González, 2007).

Como es sabido, la textura, o combinación de partículas primarias, gobierna numerosos factores importantes para el crecimiento vegetal: capacidad de almacenar agua y nutrientes, infiltración, facilidad para el laboreo, etc. En principio, la variabilidad de la textura de los suelos y estériles mineros puede ser tan amplia como la que se deriva de las propiedades de las rocas de recubrimiento que se convierten en estériles: granulometría de la roca y alterabilidad, así como de la mezcla de diferentes tipos de rocas. La mezcla intencionada de distintos tipos de estériles al escombrar puede dar como resultado texturas más equilibradas que el vertido por separado, como se constató en la gran escombrera de Lignitos de Meirama (Herranz-Villafruela, 1995; Seoane-Labandeira *et al.*, 1995). Como la textura influye en la capacidad de almacenamiento de agua, ésta crece al aumentar la proporción de rocas de textura fina (arcillas, limolitas o pizarras), y también se incrementa claramente con el tiempo transcurrido debido a la generación de finos por alteración. Zeleznik y Skousen (1996) resaltaron que la modificación de la textura a lo largo del tiempo se produce a expensas del contenido en elementos gruesos. En nuestro país, se ha observado que los fragmentos de rocas blandas de la formación Escucha (en Utrillas) y las lutitas del Estefaniense (en El Bierzo) se comportan de modo semejante a agregados de suelo en el interior de perfiles de suelos mineros (IGME, 2003).

Por otro lado, las texturas de muestras de suelos mineros de 25 a 100 años de antigüedad tienden a ser similares a las de los suelos nativos del entorno (Thurman y Sencindiver, 1986). En los suelos desarrollados sobre la escombrera de Lignitos de Meirama, se ha observado también que las texturas son similares a las de los suelos naturales gallegos, aunque se reconoce que, dado el escaso tiempo transcurrido de desarrollo de los suelos, las texturas dependen del origen y distribución de los materiales estériles (Leirós de la Peña *et al.*, 1995). En el Bierzo (León), con muy poco tiempo transcurrido, se observó que la caracterización de la textura, tanto en superficies de escombreras, como en suelos estudiados en zonas en proceso de rehabilitación, concuerda con la que presentan los suelos naturales, debido posible-

mente al bajo nivel evolutivo de los suelos en las zonas de estudio (Arranz González, 2006). También en Utrillas (Teruel), las texturas de endopediones naturales fueron semejantes a la gran mayoría de las texturas encontradas en los horizontes sub-superficiales de los suelos mineros (Arranz-González, 2007).

Estructura y densidad aparente

Salvo cuando se realizan aportes de "tierra vegetal", en la que puede haberse conservado en mayor o menor medida la estructura original, los estériles mineros brutos tienen ausencia absoluta de estructura edáfica. Sin embargo, con el paso del tiempo, y si existe colonización o siembra de vegetación, se distingue un horizonte superficial delgado con estructura granular ligada a las raíces (Johnson y Skousen, 1995). También Leirós de la Peña *et al.* (1995) describieron cómo la capa superficial de los perfiles de los suelos de las escombreras de Lignitos de Meirama (La Coruña) fue mostrando rasgos indicativos de la acción de procesos edafogénicos, destacando el enraizamiento, en ocasiones muy denso, y la formación de estructura del suelo, generalmente de tipo migajoso y ligada a las raíces. En Arranz-González (2006, 2007) también se ha descrito la existencia de capas superficiales delgadas, con estructura granular ligada a los sistemas radiculares de las gramíneas. En horizontes sub-superficiales fue frecuente encontrar elementos gruesos lutíticos que solían presentar colores abigarrados. A pesar de conservar la forma original derivada de la simple fragmentación, se mostraban como ligeramente adherentes y plásticos y las raíces los penetraban, por lo que, desde el punto de vista de la disponibilidad de agua, pueden comportarse de forma semejante a agregados de suelo (Arranz-González, 2006, 2007).

La densidad aparente es una medida ampliamente utilizada para estimar el grado de compactación del suelo. Este parámetro tiene una relación muy directa con la estructura y porosidad y puede ser de hecho registrada para diferentes horizontes y tipos de suelos como una guía a través de la cual el proceso de rehabilitación puede ser medido y controlado en parte. De acuerdo con esto, Leirós de la Peña *et al.* (1995) explicaron cómo los suelos de un año desarrollados sobre los estériles de la mina de Lignitos de Meirama poseían valores de densidad aparente muy elevados ($1,7 \text{ t/m}^3$), disminuyendo progresivamente con la edad hasta alcanzar cifras de $1,09 \text{ t/m}^3$ en suelos de cinco años. En escombreras de la provincia de León, los valores de densidad aparente medidos fueron en general superiores a los que pudieron ser

medidos en muestras de suelos naturales (IGME, 2003). Los valores de la densidad aparente medidos sobre agregados de suelo también indicaron un elevado grado de compactación en suelos mineros de Valdesamario y Carrasconte (Piedrafita de Babia), siendo bastante superiores a los valores obtenidos en muestras de suelos naturales, superando o rondando casi siempre el valor de $1,7 \text{ t/m}^3$, y alcanzando valores tan altos como $2,07 \text{ t/m}^3$.

Propiedades químicas

Riqueza en nutrientes y materia orgánica

Como es sabido, nitrógeno, fósforo y potasio son los nutrientes considerados mayores para las plantas, y junto con calcio, azufre y magnesio son los elementos esenciales abundantes o macroelementos, a los que se suman los oligoelementos: boro, hierro, silicio, cinc, manganeso, cobre, molibdeno, cobalto y cloro. En estériles mineros, usualmente, los contenidos en elementos menores son adecuados para el desarrollo vegetal, y los elementos nutritivos que aparecen en concentraciones limitantes en estos suelos son el N y el P, a los que se une el Ca y Mg en suelos ácidos (Sandoval *et al.*, 1973; Bradshaw y Chadwick, 1980; Daniels y Zipper, 1988; Roberts *et al.*, 1988).

Un suelo incipiente, formado de modo natural por la retirada de una lengua glacial o por un depósito importante de materiales no tiene materia orgánica, por lo que es corriente que carezca de nitrógeno. Por semejanza, se ha considerado que este razonamiento es aplicable a los terrenos alterados por minería. Contrariamente a las afirmaciones anteriores, también se ha sugerido que el N retenido dentro de los minerales silicatados puede servir como fuente para las plantas pioneras sobre paisajes estériles (Adams y Stevenson, 1964). Li y Daniels (1994) afirmaron que pueden existir importantes cantidades de N en los estériles frescos de carbón. Según dichos autores, se trata de nitrógeno en forma de ión amonio ligado a las micas y de nitrógeno orgánico no hidrolizable procedente del carbón. Ambos tipos son estables y no disponibles para las plantas. Vandevender y Sencindiver (1982) afirman que ciertas capas de recubrimientos de carbón pueden contener cantidades apreciables de nitrógeno, y que, incluso, el aporte del mismo puede no ser necesario cuando están presentes. De la revisión de los datos relativos a la superficie de escombreras de la provincia de León y de Teruel, recogidos en IGME (2003), no es posible hablar de deficiencias en los niveles de N extraíble por el método Kjeldahl, obteniéndose valores varia-

bles entre 0,1 y 0,4%. Sin embargo, Seoane-Labandeira *et al.* (1995) encontraron contenidos muy homogéneos y bajos en los estériles de Meirama ($0,02 \pm 0,001\%$). Así pues, en lo que se refiere a estériles de carbón, no queda claro en qué medida puede haber N disponible, aunque se suele asumir, con un criterio práctico, que inicialmente estará ausente, pues, en aquellos estériles con bajos contenidos en N disponible se corre el riesgo de que la vegetación no se instale correctamente, pudiendo generarse problemas de erosión. Por ello, a la hora de recomendar dosis de aplicación de fertilizantes, tal vez es mejor un aporte estándar que un ajuste afinado, como sugieren Daniels y Zipper (1997), esperando que las necesidades puedan ser posteriormente cubiertas por fijación biológica (a través de la introducción de leguminosas sobre todo). Esta forma de actuar, con aportes de N en varias fases y siembra de formaciones de gramíneas y leguminosas, llevó a que con el paso de los años se acumularan contenidos de hasta 0,13% de N en los horizontes superficiales de las escombreras de Meirama.

El otro elemento que suele aparecer como limitante en este tipo de suelos es el P. Tanto en As Pontes como en Meirama se constataron niveles muy variables y siempre bajos de P extraíble con ácido acético en los estériles (Leirós de la Peña *et al.*, 1989). A veces, los valores elevados de pH, pueden explicar la baja disponibilidad de P, como ocurría en algunas de las escombreras analizadas en IGME (2003). Según Bradshaw y Chadwick (1980) el fósforo puede verse también limitado debido a la alta capacidad de fijación del mismo en estériles con grandes contenidos en fragmentos gruesos procedentes de areniscas. Este potencial de adsorción y retención de P en suelos mineros ha sido demostrado por Roberts *et al.* (1988). Además, la alteración de los suelos mineros determina que se enriquezcan en óxidos de Fe que secuestran el P. Esta tendencia se incrementa con el tiempo. Como el P ligado a la materia orgánica no está sujeto a esa fijación, puede ser crítico el establecimiento de una reserva orgánica de P durante el proceso de restauración. Grandes cantidades de fertilizante pueden asegurar que pueda estar disponible suficiente P durante los primeros años, hasta que se construye esa reserva orgánica de P (Daniels y Zipper, 1988).

Además de un almacén de nutrientes, la materia orgánica del suelo proporciona carbono y energía a los microorganismos del suelo, estabiliza y une a las partículas del suelo en agregados, mejora la capacidad del suelo para almacenar y permitir el flujo de agua y aire, incrementa la capacidad de intercambio catiónico y disminuye la posibilidad de compacta-

ción. En definitiva, es cierto que las plantas pueden vivir sin materia orgánica, pero se reconoce que la presencia de la misma facilita mucho las cosas en procesos de rehabilitación de terrenos mineros (Bradshaw y Chadwick, 1980). Leirós *et al.* (1996), por ejemplo, mostraron como la incorporación de purín de vacuno sobre los estériles mineros de Lignitos de Meirama puede servir para mejorar rápidamente las capacidades edáficas básicas de producción, degradación de compuestos y filtrado.

Como curiosidad, es posible citar otro tipo de enmendantes orgánicos que, en ocasiones se encuentran próximos a algunas áreas de explotación de carbón: los humatos o leonarditas. Aunque, estrictamente, la palabra humato se refiere a cualquier sal del ácido húmico, desde un punto de vista litológico se refiere a rocas carbonosas alteradas, ricas en materia orgánica, normalmente limolitas o argilitas. Los humatos contienen materia orgánica que es semejante en muchos aspectos a la que se encuentra de forma natural en los suelos. Suele evaluarse por su contenido en ácido húmico extraíble con hidróxido sódico (Gosz *et al.*, 1977). Blasco Galve *et al.* (2002) describieron experimentos controlados de laboratorio para evaluar diferentes tipos de enmiendas a los suelos del entorno del humedal de la Corta Alloza (Teruel), seleccionando finalmente las leonarditas procedentes de la explotación minera de carbón Corta Barrabasa. Los resultados indicaron que la enmienda con leonardita mejoraba la calidad del substrato y del agua, comportándose como un fertilizante gradual de nitrógeno en forma de nitratos, reduciendo la conductividad del agua y aumentando su pH.

Al hilo de esto último, es pertinente explicar que los métodos más empleados en la determinación del contenido en materia orgánica del suelo, y también en terrenos alterados por minería, suelen basarse en la oxidación o en la combustión de la misma, habiéndose comprobado que dichos métodos atacan también en parte al carbón residual que pudiera estar presente en determinados estériles mineros. Opeka y Morse (1979) demostraron que el carbón (especialmente las partículas no visibles) interfiere en las medidas de materia orgánica. Concluyeron que puede ser necesario desarrollar métodos de medida del contenido de materia orgánica en suelos mineros que consigan eliminar las interferencias producidas por el carbón, las pizarras carbonosas y, posiblemente, otras sustancias. Sin embargo, es curioso que se encuentren muy pocas referencias posteriores sobre los problemas que pueden aparecer cuando se mide el contenido en materia orgánica del suelo en estériles que contienen restos de carbón. Muy posiblemente,

esto se deba a que gran parte de la literatura dedicada a estériles y suelos mineros sea norteamericana, donde, desde hace muchos años, los estériles mineros han sido recubiertos normalmente con estériles seleccionados no carbonosos o suelos nativos (por imperativo legal). Entre las citas que tratan el tema, puede ponerse como ejemplo el comentario de Whitford y Elkins (1986), los cuales expresaron literalmente que los estériles mineros procedentes de la minería de carbón pueden contener elevados niveles de materia orgánica, la cual es esencialmente carbón residual, y que este material orgánico no puede considerarse equivalente a la materia orgánica edáfica, desde el punto de vista de las funciones que realiza esta última. A la misma conclusión se llegó en los trabajos de Arranz-González (2006, 2007). Sin embargo, Rumpel y Kögel-Knaber (2001) han demostrado que, cuando se trata de lignitos, los restos de carbón se comportaron como la materia orgánica edáfica en dos suelos mineros de 14 y 37 años de edad. Por todo lo dicho, parece claro que la presencia de materia orgánica de origen geogénico va a interferir en las medidas analíticas de materia orgánica del suelo y, aunque es posible que ese carbono fósil retorne al ciclo actual de la materia orgánica por intervención de hongos y otros microorganismos, no está claro que esto ocurra a corto plazo, ni que importancia ecológica inmediata puede jugar. Todo ello hace recomendable la incorporación masiva de materia orgánica en superficie, incluso cuando las capas más superficiales del nuevo suelo minero son materiales edáficos preservados o importados. Al margen de los más tradicionales (residuos agrícolas, ganaderos y forestales), los residuos compostados y, sobre todo, los lodos de depuradora presentan un extraordinario potencial para su aplicación sobre estériles y suelos mineros, siempre y cuando se evalúen los riesgos potenciales para el medio ambiente.

Acidez y toxicidad

La medida del pH es considerada un elemento de juicio fundamental en la caracterización de suelos y muestras de suelo debido a que afecta a la disponibilidad de nutrientes y a la actividad microbiana. En los suelos, el rango más favorable de pH está entre 6 y 7, en el que la disponibilidad de los principales nutrientes es máxima. En los suelos naturales, el pH está fuertemente controlado por la mineralogía, el clima y el grado de evolución del suelo. Sin embargo, como es sabido, la oxidación de los disulfuros de hierro acompañantes del carbón y las capas próximas puede ser determinante en el pH de los estériles y

suelos mineros y en la generación de aguas ácidas. En el caso del carbón, la gran mayoría de los sulfuros asociados se dan en forma de pirita y marcasita, ambas con un 53,4% de S.

El valor de pH ha sido la base de todos los sistemas de clasificación y evaluación de suelos mineros desde 1948 (Lyle Jr., 1980), junto con otros caracteres como la pedregosidad, el color y la textura. Sin embargo, Daniels y Zipper (1997), en referencia a suelos mineros originados por la minería de carbón, han afirmado que el pH puede cambiar rápidamente cuando los fragmentos rocosos se alteran y oxidan, pudiendo en pocos meses pasarse de 8 a 3 en el mismo punto. Además, dichos autores han afirmado que su valor puede variar mucho en decímetros de distancia recorridos sobre el terreno que se muestrea. También Monterroso *et al.* (1993a) encontraron que el pH superficial variaba enormemente incluso dentro de parcelas establecidas sobre materiales estériles homogéneos en la escombrera de la Mina Puentes. Resultados parecidos han sido reconocidos en IGME (2003). Así pues, tal vez sea más interesante intentar conocer los tipos de acidez y el potencial de generación de la misma que el simple valor del pH. En este sentido, Costigan *et al.* (1981) distinguen tres tipos de acidez: acidez activa (contenido en hidrogeniones libres de la solución del suelo), acidez en reserva (relacionada con el contenido de hidrogeniones en el complejo de cambio) y acidez potencial u oxidable (capacidad de generación de acidez del suelo o estéril debida a minerales alterables, cuando son expuestos al aire). Esta última es la más difícil de corregir, y su corrección dependerá, en buena parte, del contenido en elementos neutralizantes presentes en la misma masa de suelo o estéril. De acuerdo con esto, Monterroso *et al.* (1993a) descubrieron que la buena selección de los materiales escombrados (con baja capacidad de generación de acidez) era más influyente sobre el pH final de la superficie de la escombrera de As Pontes que las enmiendas con materiales correctores de la acidez.

También es cierto que el valor del pH al que puede llegarse por alteración de los minerales presentes en los estériles mineros puede tener efectivamente mucha importancia donde la minería supone una modificación radical del mismo con respecto al de los suelos originales, pero no tanto donde no es así. Por ejemplo, en Carrasconte (Piedrafita de Babia) y Valdesamario, ambos en la provincia de León, el pH de los suelos naturales es muy inferior al de las muestras tomadas en suelos mineros, y la acidez de cambio también es muy superior en los horizontes de suelos naturales, a excepción de aquellos perfiles que, por su posición en fondo de valle o de terrazas

bajas, han podido enriquecerse en bases procedentes de las laderas cercanas (Arranz-González, 2006). En este caso, la medida del pH, por sí sola, no proporciona demasiados criterios para elaborar propuestas de mejora o definir prácticas de manejo, siendo útil la comparación con los suelos del entorno y la evaluación de la acidez potencial.

La importancia que tiene la acidez potencial llevó a que investigadores de la Universidad de Virginia Occidental (*West Virginia University*) comenzaran a desarrollar un sistema para contabilizar la producción potencial de ácidos y bases de los recubrimientos mineros, que después se aplicó a escombreras y suelos mineros: el *Acid-Base Accounting* (ABA), o Contabilidad Ácido-Base. Básicamente, se pretende evaluar, por un lado, la capacidad de generación potencial de acidez a través de la medida del azufre total o pirítico presente, y por otro, la capacidad de neutralización potencial de los materiales, medida como carbonato cálcico equivalente. El potencial de generación de acidez (AP), expresado como t CaCO₃ equivalente/1000 t de material, se calcula normalmente multiplicando el porcentaje de S-pirítico por el factor 31,25. La capacidad de neutralización potencial de los materiales (NP) se mide por titulación mediante NaOH del exceso de HCl empleado para atacar el material (Sobek *et al.*, 1978). La diferencia entre los valores de NP y AP es la capacidad neta de neutralización potencial (NNP), expresada también en t CaCO₃ equivalente/1000 t de material. Normalmente se asume que el elemento más importante a la hora de producir acidez es el S en forma de sulfuro (pirítico), pero también intervienen otras formas de azufre, existiendo a día de hoy mucha controversia sobre este aspecto. El otro concepto clave en el método es el de neutralización potencial (NP) (Smith *et al.*, 1974), el cual designa la capacidad de todo el conjunto de materiales capaces de neutralizar la acidez que pudiera generarse. El cálculo de la capacidad de neutralización potencial de todos los materiales presentes, susceptibles de poseer poder neutralizante de la acidez generada, se basa en un método clásico, más o menos modificado (Jackson, 1964). Este método puede producir errores derivados de la presencia de siderita, que suele estar presente en los recubrimientos mineros de carbón y contribuye a incrementar el valor medido de NP, sin que en realidad proporcione poder de neutralización. Sin embargo, en términos generales, puede considerarse un cómodo y rápido procedimiento cualitativo para evaluar los recubrimientos y estériles mineros como materiales de calidad para la formación de suelos y predecir la calidad de las aguas de drenaje en la zona después de la explotación (Skousen *et al.*, 2001). En Perry (1998) es

posible encontrar una buena revisión de las diferentes modificaciones que ha sufrido el procedimiento de Contabilidad Ácido-Base, así como de los criterios que suelen emplearse para juzgar los resultados obtenidos después de aplicarlo a diferentes materiales.

Lo ideal es poder practicar este tipo de valoraciones antes del vertido o extendido de los materiales estériles, tal como realizaron Urrutia *et al.* (1992). Estos autores analizaron un buen número de muestras de estériles en la Mina Puentes: lignitos, filitas y mezclas de arcillas, lignitos de mala calidad, arenas, materiales margosos, cenizas volantes y fragmentos de filitas. Se vio que, en muchas muestras, la capacidad de neutralización potencial excedía al 90% de la capacidad potencial de generación de acidez (evaluada mediante ensayos de oxidación con H_2O_2 a pH 5,5 y medida en $cmol(+)$ por cada kg de material), aunque también se obtuvieron valores más negativos, sobre todo, en muestras de lignitos y filitas.

En la Tabla 1 se muestran algunos resultados de aplicar el método ABA a muestras superficiales de escombreras de carbón en la provincia de León. Los estériles analizados tenían un contenido en azufre pirítico bastante variable (0,076-0,37 %) y una capacidad de neutralización potencial también variable (26,5-49,5 t $CaCO_3$ equivalente/1000 t de material). Los valores de pH iniciales podían llegar a ser bastante altos (8,23 ó 8,73; Tabla 1). Estos valores están claramente en desequilibrio con el medio y, por otro lado,

son los únicos que superan el valor de 7. Los valores tan altos de pH expresan una ausencia o falta de alteración de la pirita presente. Según se va produciendo dicha alteración, el pH va descendiendo y se va consumiendo capacidad de generación de acidez y capacidad de neutralización. Los resultados positivos de NNP, permiten esperar que, en cualquier caso, la acidez que pueda generar el azufre pirítico que queda será compensada sobradamente. Sin embargo, aunque en las capas superficiales NNP pueda ser positiva, en Arranz-González (2006) se aportan datos que permiten esperar que exista capacidad neta de generación de acidez en capas profundas de suelos mineros en las mismas zonas, debido a la existencia de azufre pirítico en cantidad suficiente para que ello ocurra. En esos suelos sucederá previsiblemente algo semejante a lo descrito por Horbaczewski (2007). Este autor, mediante el control del contenido en pirita a diferentes profundidades de suelos mineros reconstruidos en minas de lignito, comprobó como éste se redujo significativamente a lo largo de un periodo de diez años (1987-1997), lo que continuará hasta la práctica desaparición de la pirita pasados otros 25 años. Como contrapartida, durante los años 1992 a 2002, el contenido de sulfatos en las aguas superficiales creció fuertemente para, seguidamente, iniciar una lenta disminución. Algo parecido puede estar ocurriendo en muchos suelos mineros que en superficie ya no tienen capacidad de generación de acidez y están cubiertos de vegetación, pero que pueden

MUESTRA	COLOR Munsell (Seco)	pH _{agua}	% S pirítico	AP (tCO ₃ Ca/ 1000t)	NP (tCO ₃ Ca/ 1000t)	NNP(tCO ₃ Ca/ 1000t)
VAL-PIL-I	5Y 4/2	4,05	0,087	2,7	38,1	35,4
VAL-PIL-II	5Y 3/1	4,34	0,091	2,8	44,1	42,3
VAL-PIL-III	5Y 4/1	5,72	0,076	2,4	27,2	24,8
VAL-PIL-IV	5Y 4/4	5,09	0,370	11,6	32,2	20,6
VAL-PIL-V	5Y 3/1	4,49	0,290	9,1	40,0	30,9
VAL-PIL-VI	5Y 3/1	6,16	0,370	11,6	44,7	33,1
VIL-PIL-I	5Y 4/4	6,65	0,087	2,7	41,7	39,0
VIL-PIL-II	5Y 3/2	8,23	0,250	7,8	26,5	18,7
VIL-PIL-III	5Y 3/1	8,73	0,180	5,6	35,9	30,3
VIL-PIL-IV	5Y 4/2	5,78	0,160	5,0	49,5	44,5
VIL-PIL-V	N 3/0	6,10	0,170	5,3	37,2	31,9

Tabla 1. Características físico-químicas y contabilidad ácido-base de muestras compuestas superficiales de escombreras situadas en Valdesamario, León (VAL) y Carrasconte, Piedrafita de Babia (VIL). pH en relación suelo/agua 1/2,5. S pirítico medido por el método de Sobek *et al.* (1978) AP: capacidad de generación de acidez potencial, estimada multiplicando el porcentaje de S pirítico por el factor 31,25. NP: capacidad de neutralización potencial, medida por el método de Jackson (Jackson, 1964). NNP: capacidad neta de neutralización potencial (NP-AP). Modificado de IGME (2003)

Table 1. Physical-chemical characteristics and acid-base account of surface samples from mining spoil tips at Valdesamario, León (VAL) and Carrasconte, Piedrafita de Babia (VIL). pH in soil /water ratio of 1/2.5. Pyritic S measured by the method of Sobek *et al.* (1978). AP: acidity potential, estimated by multiplying the pyritic S percentage by a conversion factor of 31.25. NP: neutralization capacity, measured by Jackson's method (Jackson, 1964). NNP: net neutralization potential (NP-AP). Modified from IGME (2003)

tenerla en horizontes profundos, por lo que el agua que los atraviesa, si tiene salida en puntos de menor cota, todavía es capaz de alterar la calidad de las aguas superficiales.

Se ha afirmado muchas veces que la generación de acidez derivada de la oxidación de la pirita puede llevar asociada la liberación perjudicial de metales pesados que pudieran estar presentes en los estériles mineros. Este efecto ha sido sobradamente demostrado en minería de sulfuros metálicos, pero no existen más que referencias muy puntuales en la bibliografía internacional referente a minería de carbón. En España, la gran mayoría de estudios realizados sobre estériles y suelos mineros originados por la minería de carbón no han considerado la posibilidad de que se presenten problemas de toxicidad por metales pesados. Como excepción pueden citarse algunos trabajos desarrollados en las dos grandes explotaciones de lignitos gallegas. En Lignitos de Meirama, los niveles de Co y Ni extraídos con ácido diluido en suelos sobre estériles mineros fueron ligeramente superiores a los de los suelos naturales de Galicia. Sin embargo, evaluando el riesgo de movilización, se determinó que el Zn era el elemento con mayor riesgo de movilización, seguido de Co y Cu (Seoane *et al.*, 1991). Según Macías *et al.* (1992), los contenidos totales de metales pesados en las escombreras de la Mina Puentes son moderados o bajos, y similares a los existentes en suelos desarrollados sobre materiales sedimentarios, sin que se superen, de modo manifiesto, las concentraciones indicativas de riesgo de fitotoxicidad. Los niveles de metales biodisponibles (estimados por extracción con DTPA) en los suelos en desarrollo sobre la escombrera de la Mina Puentes fueron también algo superiores a los medidos en suelos naturales del entorno (Monterroso *et al.*, 1993a, 1993b), aunque resultaron estar muy por debajo de los límites máximos de toxicidad propuestos para suelos de mina por Schafer *et al.* (1979).

Generalmente se reconoce que la principal problemática de los suelos mineros de carbón deriva en muchos casos de la toxicidad asociada al alto contenido en aluminio y manganeso, que impide el buen desarrollo radicular, pero también por la liberación de estos elementos a las aguas superficiales. Se ha afirmado que, en suelos ácidos en los que el nivel de nutrientes es adecuado y las cantidades de Al y Mn son bajas, el desarrollo de la vegetación es normal (Ammons, 1979). Sin embargo, dependiendo de los tipos de suelos naturales presentes en el entorno minero, puede darse el caso de que el Al de cambio sea mayor en los suelos naturales que en los suelos mineros (IGME, 2003). Curiosamente, en la Mina Puentes, los mayores valores de Al de cambio se

encontraron en suelos mineros "enmendados" con tierras procedentes de los horizontes A de suelos del entorno (Monterroso *et al.*, 1993a).

Salvo cuando por desgracia o mala gestión han quedado en superficie estériles especialmente desfavorables, cabe decir que la acidez de los suelos mineros generados por la minería de carbón no representa un problema tan grave o tan extenso como se ha afirmado muchas veces, sobre todo en entornos de suelos naturales de carácter ácido, sin olvidar que también concurren otras circunstancias en la capacidad de rehabilitación de un terreno minero (pendiente, orientación, retención de humedad, etc.). No obstante, las prácticas encaminadas a la disminución de la acidez (enmiendas calizas, encalados) han estado generalizadas. La justificación estriba en la mejora de la productividad y la disponibilidad de nutrientes, sobre todo si se piensa en coberturas herbáceas, aunque es razonable pensar también que parte de los agentes neutralizantes que se aporten pueden por lavado mejorar la situación de horizontes profundos, normalmente fuera de control. Existen numerosos casos documentados en la literatura sobre la aplicación de encalantes tradicionales (caliza agrícola, dolomía, cal apagada, etc.) sobre suelos mineros, si bien los más investigados en España (en Galicia más concretamente) se refieren al empleo de cenizas volantes de centrales térmicas. Las cenizas volantes han sido efectivas en la neutralización de la acidez de estériles mineros de carbón que no pudieron corregirse con otros tipos de encalantes. Por ejemplo, no habiendo dado frutos ciertos experimentos en los que se trataba de corregir con caliza la extrema acidez de estériles arcillosos en la Mina Puentes, sí que se consiguieron buenos resultados utilizando las cenizas volantes de la Central Térmica de As Pontes (500 a 100 t/ha) sobre estériles de las mismas características (Val Caballero *et al.*, 1991; Seoane y Leirós, 1992; Seoane y Leirós, 2001). En relación con el uso de cenizas volantes (y otros subproductos de la combustión del carbón), Korcak (1996) advertía de que pueden existir riesgos de posible acumulación en suelos y plantas de: Se, As, Mo y B, recomendando que en cualquier plan de revegetación sean considerados.

Salinidad

La presencia de elevadas concentraciones de sales en suelos mineros procedentes de la minería de carbón, lo que puede tener reflejo sobre la productividad del suelo, puede ser producto del empleo de recubrimientos ricos en sales (Sandoval y Power, 1977) o como consecuencia de la oxidación de la pirita pre-

sente en los estériles mineros (Daniels y Zipper, 1997). Por ello, las sales que suelen estar presentes en suelos mineros desarrollados sobre estériles de carbón suelen ser sulfatos de Na, Ca, Mg y K (Daniels y Zipper, 1997). Normalmente la salinidad se evalúa, por comodidad, a través de lecturas de conductividad eléctrica en soluciones de suelo o en pasta saturada, las cuales están altamente correlacionadas con la concentración total de sales. Suelos con bajo pH y elevada conductividad eléctrica, como los que muchas veces se encuentran en terrenos alterados por la minería de carbón, son también normales en sedimentos costeros o fluviales, con abundancia de sulfuros debido a la descomposición anaerobia de la materia orgánica. Poch *et al.* (1989) encontraron que las capas superficiales de la escombrera de Sant Corneli (El Bergadá, Barcelona), formada con materiales procedentes de calizas y calcilitas ricas en carbón, mostraban áreas donde la conductividad eléctrica superaba los 2 dS/m a 25° C, en el extracto de pasta saturada, debido a la presencia de yeso, supuestamente formado a partir de la oxidación de las piritas presentes en los materiales o que ya se hallaba en ellos.

La conductividad eléctrica en unas escombreras estudiadas en la Corta Santa Lucía (Cuevas de Portalrubio, Teruel) llevó a calificarlas de suelos altamente salinos, con valores de hasta 3,98 dS/m en solución 1:5. Se observó además que la conductividad eléctrica también podía variar enormemente en puntos relativamente próximos (IGME, 2003). En las superficies en proceso de rehabilitación de Sabina-Umbrión (Utrillas, Teruel), se comprobó que los problemas de salinidad existentes, a veces muy graves, se originaban tanto por los estériles y tierras empleados para recubrir a los estériles más carbonosos, como por la oxidación de la piritas de horizontes profundos carbonosos. Los valores de CE llegaron a ser terriblemente altos en estériles carbonosos, en los cuales, además de existir una inherente salinidad, ésta se ha incrementado debido a la oxidación de la piritas o los bisulfuros de hierro acompañantes del carbón (IGME, 2003; Arranz-González, 2007).

Perfiles de suelos mineros

En numerosos casos, se ha constatado la posibilidad de regenerar los terrenos mineros en total ausencia de materiales edáficos, como en las escombreras de Lignitos de Meirama. Sin embargo, también en numerosas ocasiones, el terreno alterado es lo suficientemente problemático como para que todos los esfuerzos emprendidos proporcionen una ayuda sólo

temporal, cuando no un inmediato fracaso. Intuitivamente, parece razonable pensar que muchos de los problemas que se plantean para lograr la rehabilitación de terrenos cubiertos con estériles mineros pueden ser solucionados si se recubren a su vez con buen suelo. La idea es que los suelos o las capas de suelos elegidos sean recolocados en condiciones óptimas, hasta profundidades fijas, sobre una superficie modelada sobre estériles de recubrimiento que define la forma final del terreno (Ramsay, 1986). En general, sobre todo si se trata de horizontes superficiales, la restitución del suelo puede actuar como un inóculo de vida (bacterias, hongos, esporas, semillas, rizomas, etc.) propios del ecosistema original. Estrictamente, puede considerarse que a la finalización de los movimientos de tierras, y si no se realizan aportes de tierra vegetal, queda en superficie un material que representa el momento cero en la edafogénesis (Poch *et al.*, 1989). Schafer *et al.* (1979) han afirmado que el recubrimiento con tierra vegetal o "topsoil" genera suelos mineros similares en algunos aspectos a los suelos no alterados, por lo que estas técnicas simulan cientos o miles de años de evolución en comparación con lo que ocurre sobre los estériles desnudos.

Una primera y muy simple clasificación de modelos de perfiles de suelos mineros podría admitir cuatro tipos. Primero estarían los suelos desarrollados sobre estériles mineros cuyas características han permitido una colonización natural que se ve facilitada en climas húmedos. Un estado incipiente, en el que todavía no son reconocibles rasgos de edafización (estructura edáfica) aunque si puedan reconocerse rasgos de meteorización, podría ser el representado en la Figura 1.1. Si el proceso descrito se prolonga puede dar lugar a que se distingan horizontes A, enriquecidos en materia orgánica (transformada) y con estructura edáfica (Figura 1.2). Esta situación puede acelerarse cuando sobre los estériles mineros se han realizado prácticas de rehabilitación más o menos intensas (desde el simple abonado y siembra tradicionales, hasta la secuencia más compleja de operaciones planificadas que pueda pensarse). También existen los suelos formados sobre materiales terrosos de recubrimiento o "tierra vegetal" vertidos o extendidos en bruto sobre estériles, pudiendo haberse dado otras operaciones de enmienda, laboreo superficial y siembras o plantaciones. Un perfil de este tipo podría ser el representado en la Figura 1.3. Es posible que estos últimos sean los más comunes desde los años ochenta. En la Tabla 2 se muestran algunas descripciones de perfiles de suelos mineros contruidos de esta forma. La mayoría de suelos mineros cuyo origen es semejante a los anteriormente descritos poseían una secuencia tipo A-

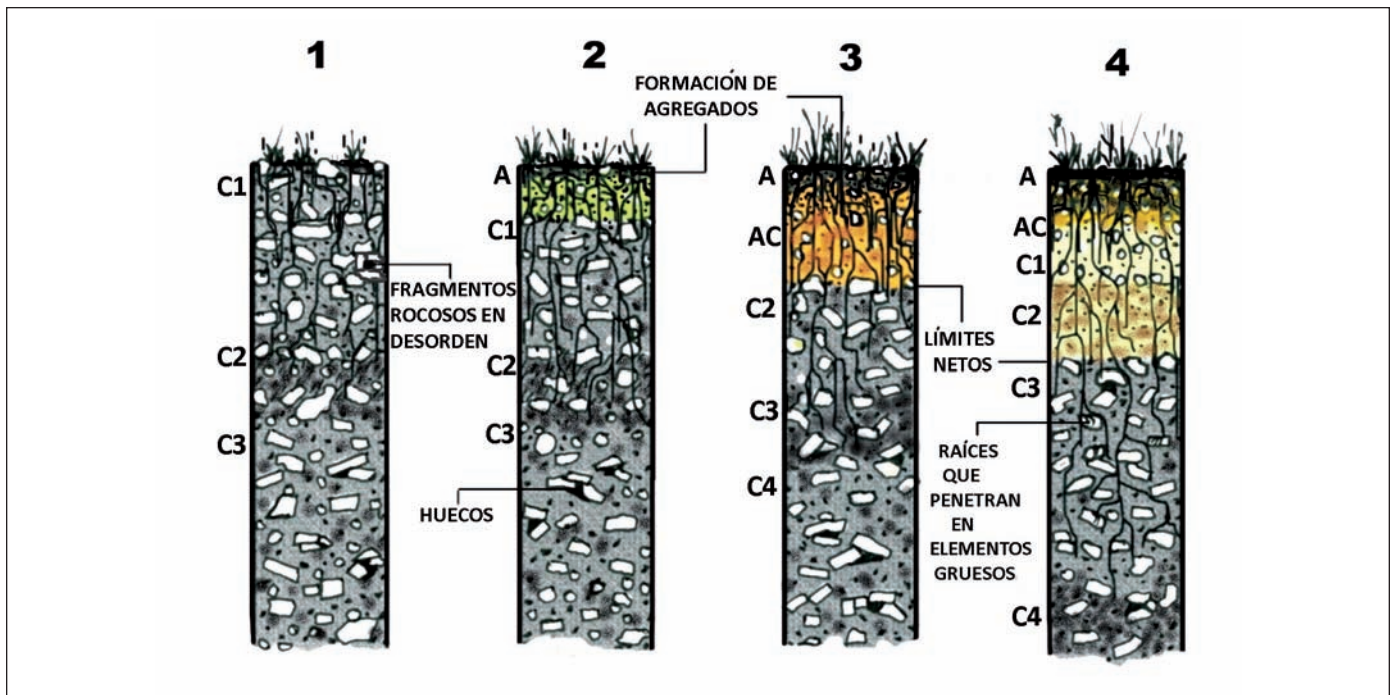


Figura 1. Hipotéticos perfiles de suelos mineros. 1) Estériles cabolíticos. Se supone que sobre este suelo minero se han aplicado fertilizantes, correctores del pH y semillas de pratenses. 2) Suelo minero carbolítico enmendado con grandes cantidades de abono orgánico y sembrado. Se supone que han transcurrido algunos años y se ha iniciado la formación de un horizonte superficial con estructura granular. 3) Estériles recubiertos con tierra vegetal, fertilizados y sembrados. 4) Perfil de suelo minero construido a partir de materiales edáficos y de recubrimiento seleccionados, antes de las labores de revegetación

Figure 1. Hypothetical mine-soil profiles. 1) Carbolithic spoil; fertilizers, pH correctors and grass seeds are presumed to have been applied over this mine soil. 2) A carbolithic mine soil, seeded and rectified with considerable quantities of organic manure; some years are presumed to have passed and a granular surface horizon has begun to form. 3) Top-soiled, fertilized and seeded mine spoils. 4) Mine-soil profile constructed with selected overburden and soil materials before revegetation

C o A-AC-C (Sencindiver y Ammons, 2000). Por último, estarían aquellos suelos en los que el perfil resultante del suelo es producto de una planificación con conocimiento en lo que se refiere a gestión de los materiales edáficos y al aporte horizonte por horizonte, hasta construir un nuevo suelo o intentar reconstruir el suelo nativo (lo que podría representarse como en la Figura 1.4).

En lo que respecta al "diseño" del perfil, cuando es posible plantear anticipadamente la construcción del suelo, las posibilidades son muy variadas en función de todos los materiales de recubrimiento y los propios suelos. Lorenzo Agudo (1991) explicó cómo en Mina Enma (Puertollano) se constató que, a pesar de lo deducido a partir de análisis, en los que resultaba peor, un material de tipo rañizo, rico en arcilla, se mostró como un buen sustituto de las capas superficiales de suelo (tierra vegetal) para la construcción del nuevo suelo minero. Es más, con idéntico subsuelo, las productividades obtenidas con suelo construido con material raño-arcilloso fueron casi siempre

superiores a las obtenidas con suelos formados con tierra vegetal. Solamente en un año agrícola de pluviometría superior a la normal pasó lo contrario, es decir, efectivamente la tierra vegetal parece ser superior, si no fuera porque en las condiciones ambientales de la zona parece tomar mayor peso la disponibilidad hídrica proporcionada por el material a emplear. También este material raño-arcilloso se mostró adecuado para la reconstrucción del subsuelo, y cuando el subsuelo estaba constituido por material pizarroso resultó más adecuado recubrirlo con una capa de 70 cm de material raño-arcilloso, que con un escaso espesor de tierra vegetal (suelo nativo).

Independientemente de la complejidad de la secuencia de horizontes del suelo minero, este evoluciona rápidamente. Un horizonte A se puede desarrollar en estos suelos en un plazo de 5 años (Haering *et al.*, 1993; Roberts *et al.*, 1988; Schafer *et al.*, 1979; Varela *et al.*, 1993). Algunos suelos mineros de carbón tienen ya horizontes Bw que se ajustan a los criterios de horizonte cámbico, lo que representa un

HOR.	ESPESOR (cm)	TEXTURA	COLOR MUNSELL (Húmedo)	ESTRUCTURA
PERFIL UTR-1				
A	0-15/22	fr-ac-ar	2,5Y 4/2	Débil en bloques a masiva
2C	15/22-40/45	fr-ar	5Y 3/2	Masiva
3C	40/45-100+	fr-ar	5Y 2,5/1	Masiva
PERFIL UTR-6				
A	0-22	fr-ac-ar	10YR 5/6	Débil en bloques
C	22-55	fr-ac-ar	10YR 5/6	Masiva
2C	55-110+	fr-ac-ar	5Y 4/3, 5Y 5/6, 5Y 6/8 (*)	Masiva
PERFIL UTR-8				
A	0-15/18	fr-ac-ar	2,5Y 6/6	Débil en bloques a suelta
2C	15/18-30	fr-ar	5Y 2,5/1	Débil en bloques a masiva
3C	30-40/44	fr-ar	2,5Y 6/6	Masiva
4C	40/44-110+	ar-fr	5Y 2,5/1	Masiva
PERFIL UTR-13				
Ap	0-30	fr-ac-ar	2,5Y 5/4	Masiva
C1	30-42	fr-ac-ar	2,5Y 6/8	Masiva
C2	42-54		-	Capa de gravas
2C	54-110+	fr-ac-ar	N 3/0, 5Y 3/2, N5/0 (*)	Masiva

Tabla 2. Características descriptivas de cuatro perfiles de suelos mineros situados en el área de Sabina-Umbrión (Utrillas, Teruel). La notación de dos valores separados por una barra en los espesores denota límites ondulados o inclinados. Texturas: fr-ac-ar (franco-arcillo-arenosa), fr-ar (franco-arenosa) y ar-fr (arenoso-franca). El color se refiere a la medida en húmedo. El símbolo (*) significa que la descripción más apropiada sería: mezcla abigarrada de colores negros, grises y amarillos. Extraído de IGME (2003)

Table 2. Descriptive characteristics of four profiles of mine soils from the Sabina-Umbrión area (Utrillas, Teruel). The notation of two values separated by a thick bar denotes wavy or sloping boundaries. Textures: fr-ac-ar (sandy clay loam), fr-ar (sandy loam) and ar-fr (loamy sand). The colour refers to wet soil. The asterisk (*) means that the closest description would be a motley mix of black, gray and yellow. From IGME (2003)

grado más de evolución edáfica (Ciolkosz *et al*, 1985; Short *et al*, 1986). Thomas *et al*. (2000) estudiaron suelos mineros de diversas edades, desarrollados sobre estériles de carbón en Virginia Occidental. Describieron horizontes A en todos ellos, con espesores que fueron desde los 6 cm (en un suelo de 2 años) a los 10 cm (en un suelo de 23 años). Describieron también un horizonte Bw en el suelo más viejo (23 años). El espesor total del *solum* fue siempre inferior en los suelos mineros que el que puede encontrarse en los suelos del entorno, pero, sin embargo, con excepción del suelo minero de dos años, el grosor de los horizontes A en los suelos mineros superó al de los suelos naturales.

Varela *et al*. (1993) y Leirós *et al*. (1995) describieron cómo la capa superficial de los perfiles de los suelos de las escombreras de Lignitos de Meirama ha ido mostrando distintos rasgos indicativos de la acción de procesos edafogénicos: enraizamiento, en ocasiones muy denso, formación de estructura del suelo, generalmente de tipo migajoso, aumento de la estabilidad estructural y de la porosidad, o bien, la presencia de coloraciones más oscuras en la superficie del perfil, debido al enriquecimiento de dicha capa en

materia orgánica humificada. La presencia e importancia de estos rasgos responde a la edad del suelo. En suelos de 5 años se advirtió ya un horizonte superior granular, con una porosidad semejante a la de los suelos naturales gallegos, de hasta 28 cm de espesor, con límite neto sobre una capa de estructura poliédrica. Todos los perfiles descritos fueron siempre de tipo AC, y se calculó la velocidad media de formación del horizonte superior en unos 2,4 cm/año.

En la Tabla 3 se observan dos descripciones de suelos mineros extraídas de IGME (2003). Puede verse que, en ambos casos, la falta de estructura edáfica está generalizada, salvo en la parte más superficial de uno de ellos, en la que los elementos de estructura granulares se hayan ligados al sistema radicular, lo que es corriente en estos suelos cuando tienen cubierta herbácea, como ya se mencionó. Son suelos de muy limitada evolución, con perfiles de tipo A-C, AC-C o C, que fueron clasificados modificando una propuesta realizada por estudiosos de la *West Virginia University*. Dicha propuesta no ha sido incorporada a los criterios de la *Soil Taxonomy* (Soil Survey Division Staff, 2010) y, de hecho, existen otras propuestas de clasificación tampoco aceptadas, pero

PERFIL VAL-05			PERFIL VIL-02		
Clasificación (WVU): Xerospolent carbolítico Fecha de la observación: 24-04-02. Autor: Julio C. Arranz Localidad más próxima: Valdesamario. Situación: Talud orientado al norte en escombrera exterior de la Corta de las Ranas. Posición fisiográfica: Talud de escombrera. Pendiente: Escarpado. Vegetación o uso del suelo: Dispersa: escobas y pinos de plantación Material de origen: Lutitas, areniscas y carbón. Drenaje: Moderado. Pedregosidad superficial: Dominante. Clase 5. Afloramientos: No. Erosión: Laminar y en regueros poco grabados. Estado hídrico: Seco en superficie, húmedo en profundidad.			Clasificación (WVU): Udispolent típico. Fecha de la observación: 26-09-01 Autor: Julio C. Arranz Localidad más próxima: Piedrafita de Babia Situación: Zona de Carrasconte-El Salguero Posición fisiográfica: Talud de relleno artificial Pendiente: Escarpado Vegetación o uso del suelo: Pradera mixta Material de origen: Tierras sobre areniscas, lutitas y carbón. Drenaje: Moderado Pedregosidad superficial: Dominante. Clase 5. Afloramientos: No Erosión: Laminar y regueros. Estado hídrico: Húmedo.		
Hor.	Prof. (cm)	Descripción	Hor.	Prof. (cm)	Descripción
C1	0-38	5 Y 2,5/1 (negro); franco-arcillo-arenosa; sin estructura; ligeramente duro, no adherente, no plástico; fragmentos de areniscas y lutitas predominantes; frecuentes poros, finos y muy finos, intersticiales; pocas manchas de color 5 Y 7/6 (amarillo) en planos de exfoliación de lutitas y 10 YR 6/8 (amarillo pardusco en húmedo) en caras de areniscas; límite neto plano.	A	0-30/34	2,5 Y 4/2 (pardo grisáceo oscuro); franco-arenosa; de granular fina débil (ligada a raíces) a sin estructura; ligeramente adherente, ligeramente plástico; firme; elementos gruesos muy abundantes, areniscas y cuarcitas, angulosos y sub-redondeados, gravas y bloques; alguna caras de cantos se tiñen de 10 YR 6/8 (amarillo pardusco); pocos poros, intersticiales; frecuentes raíces finas y muy finas; límite inclinado neto.
C2	38-100+	5 Y 2,5/1 (negro); franco-arcillo-arenosa; sin estructura edáfica; duro; fragmentos de areniscas y lutitas muy abundantes; frecuentes elementos gruesos lutíticos abigarrados de 5 Y 2,5/1 (negro), 2,5 Y 3/2 (pardo grisáceo muy oscuro), 2,5 Y 6/8 (amarillo verdoso) y 2,5 Y 8/8 (amarillo), ligeramente adherentes; frecuentes poros, finos y muy finos, intersticiales; ninguna raíz.	A/2C	16-66	Nódulos N 3/0 (gris muy oscuro), 10 YR 6/6 (pardo amarillento) y 2,5 Y 8/8 (amarillo), embebidos en 2,5 Y 3/2 (pardo grisáceo muy oscuro); franco-arenosa; sin estructura edáfica; adherente, plástico; muy firme; abundantes elementos gruesos, areniscas y lutitas, angulosos y planos, medianos y grandes, hasta bloques; pocos poros, intersticiales; pocas raíces finas y muy finas; fuertemente ácido; límite gradual plano.
			2C	66-100+	Abigarrado de N 3/0 (gris muy oscuro), 10 YR 6/8 (pardo amarillento) y 2,5 Y 7/8 (amarillo); franco-arenosa; sin estructura edáfica; adherente, plástico; muy firme; abundantes elementos gruesos, areniscas y lutitas, angulosos y planos, medianos y grandes, hasta bloques; pocos poros, intersticiales; sin raíces.

Tabla 3. Descripción de dos perfiles de suelos mineros El color se midió en húmedo. Modificado de IGME (2003)
 Table 3. Description of two mine-soil profiles. Colour was measured wet. Modified from IGME (2003)

sobre las que es posible recomendar algunas lecturas para quien pueda tener interés: Sencindiver y Ammons (2000), Hartman *et al.* (2004), entre otros. Conviene avisar de que este tipo de suelos sí pueden ser clasificados dentro del sistema referencial de la FAO (WRBSR, IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007) dentro del grupo de los llamados Tecnosoles.

Conclusiones

Los suelos mineros asociados a la minería de carbón existentes en España son semejantes a los que se han descrito en otros países. Son generalmente pedregosos, aumentando la pedregosidad en las capas profundas. También, en horizontes profundos, los ele-

mentos gruesos suelen estar desordenados, presentando a veces bordes astillados y formando puentes. Con frecuencia, las raíces se afelpan alrededor de ellos cuando son duros, habiéndose observado que los fragmentos de rocas blandas se comportan de modo semejante a agregados de suelo. Los procesos de alteración, van proporcionando también unas características texturales semejantes a los de los suelos naturales. En superficie, se ha observado la formación de horizontes ricos en materia orgánica transformada, con estructura granular ligada a las raíces de la vegetación pratense. Ese enriquecimiento orgánico puede ser fundamental para activar el ciclo del N y generar una reserva de P, los cuales son los elementos nutritivos que suelen presentar deficiencias, sobre todo el segundo. En aras de mejorar el contenido orgánico se han ensayado diversos tipos de enmiendas con buenos resultados. En mayor o menor medida se han presentado problemas derivados de la generación de acidez por oxidación de la pirita acompañante a los restos de carbón. Estos problemas pueden controlarse o prevenirse a través de métodos de valoración de la generación de acidez y capacidad de neutralización que han sido aplicados en diversos trabajos. Muchas veces los problemas asociados a la generación de acidez no son tan graves, por la propia naturaleza de los entornos en que se encuentran. Sin embargo, muchos suelos mineros que en superficie ya no tienen capacidad de generación de acidez y están cubiertos de vegetación, todavía pueden tenerla en horizontes profundos, por lo que el agua que los atraviesa, si tiene salida en puntos de menor cota, todavía es capaz de alterar la calidad de las aguas superficiales. Esto último merecería ser más estudiado.

Se ha visto, como ocurre en otros países, que las propiedades físicas y químicas de estos suelos antrópicos presentan una alta variabilidad superficial. Los perfiles de los suelos descritos pueden ser considerados suelos muy jóvenes, que muestran un desarrollo incipiente en rápida evolución, siendo esperable que ocurran todavía cambios químicos, biológicos y morfológicos cuyo estudio puede ser de gran interés. Como corolario, puede afirmarse que la consideración de este tipo de terrenos desde la perspectiva de la ciencia del suelo ha sido de indudable utilidad. Se ha hecho patente, al igual que en otros lugares donde se han empleado enfoques similares, que el análisis de la información obtenida a partir de parámetros edáficos de muestras superficiales y su interpretación, es de gran utilidad práctica en procesos de rehabilitación. Más aún, se ha mostrado de gran interés la descripción y toma de muestras de perfiles en la forma en la que lo hacen los edafólogos, lo que ha

permitido comprender mejor los procesos internos y reconocer propiedades que son exclusivas de este tipo de suelos de origen antrópico.

Referencias

- Adams, R.F. and Stevenson, F.J. 1964. Ammonium Sorption and Release from Rocks and Minerals. *Soil Science Society of American Proceedings*, 28, 345-351.
- Ammons, J.T. 1979. *Minesoil Properties, Root Growth and Land Use Implications*. Ph. D. Dissertation. West Virginia University. Morgantown, WV. 222 p.
- Arranz-González, J.C. 2006. Caracterización geoambiental de lugares alterados por minería de carbón en la provincia de León (España). *Boletín Geológico y Minero*, 117 (2), 317-330.
- Arranz-González, J.C. 2007. Caracterización edafológica de lugares alterados por minería de carbón en la provincia de Teruel (España). *Documentos de Ingeniería*, 5, 19-30.
- Ashby, W.C. and Vogel W.C. 1994. *Tree planting on mined lands in the Midwest: a handbook*. Coal Research Center, Southern Illinois University, Carbondale. 115 p.
- Blasco Galve, J., Albeniz, M.A., Campas, M., Cortecero, F. y Comín Sebastián, F. 2002. Recuperación del hueco final de la explotación a cielo abierto "Corta Alloza". *XI Congreso Internacional de Industria, Minería y Metalurgia*, Zaragoza, I, 382.
- Bradshaw, A.D. and Chadwick, M.J. 1980. *The Restoration of Land. The ecology and reclamation of derelict and degraded land*. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Costigan, P.A., Bradshaw, A.D. and Gemmill, R.P. 1981. The Reclamation of Acidic Colliery Spoil: 1. Acid production potential. *Journal of Applied Ecology*, 18, 865-878.
- Ciolkosz, E.J., Cronce, R.C., Cunningham, R.L. and Petersen, G.W. 1985. Characteristics, genesis, and classification of Pennsylvania minesoils. *Soil Science*, 139, 232-238.
- Daniels, W.L. and Zipper, C.E. 1988. Improving coal surface mine reclamation in the Central Appalachian region. In: Cairns, J. Jr. (Ed.) *Rehabilitating damaged ecosystems*. Vol I. CRC Press, Boca Raton, FL. pp. 139-162.
- Daniels, W.L. and Zipper, C.E. 1997. *Creation and Management of Productive Mine Soils*. Reclamation Guidelines. Powell River Project. Virginia Cooperative Extension Publication 460-121. 12 p.
- Gosz, J.R., Barton, L. and Potter, L.D. 1977. An Evaluation of New Mexico Humate Deposits for reforestation of Mine Spoils. In: R. A. Wright (Ed.) *The Reclamation of Disturbed Arid Lands*. The University of New Mexico Press, Albuquerque, pp. 180-188.
- Haering, K.C., Daniels, W.L. and Roberts, J.A. 1993. Changes in mine soil properties resulting from overburden weathering. *Journal of Environmental Quality*, 22, 194-200.
- Hartman, B.A., Ammons, J.T. and Hartgrove, N.T. 2004. A proposal for the classification of anthropogenic soils. *Proceedings of the 2004 National Meeting of the American Society of Mining and Reclamation*. ASMR, Lexington, KY.
- Herranz Villafuella, F. 1995. El yacimiento de lignitos de

- Meirama. En: F. Guitián Ojea (Ed.). *Recuperación de las escombreras de la Mina de Lignitos de Meirama (A Coruña)*. Univ. Santiago de Compostela- Lignitos de Meirama. pp. 15-41.
- Horbaczewski, J.K. 2007. Weathering of pyrite in minesoils at Gibbons Creek Lignite Mine, Texas. En: XXVIII Annual Surface Mine Reclamation Workshop, College Station, Texas.
- IGME. 2003. *Investigación Geoambiental en áreas alteradas por actividades mineras. Reconocimiento y evaluación de la potencialidad de terrenos alterados por minería a cielo abierto*. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Madrid. Servicio de documentación del IGME. Inédito.
- IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.
- Jackson, M.L. 1964. *Análisis químico de suelos*. Omega. Barcelona.
- Johnson, C.D. and Skousen, J.G. 1995. Minesoil Properties of 15 Abandoned Mine Land Sites in West Virginia. *Journal of Environmental Quality*, 24, 635-643.
- Korcak, R. 1996. Coal Combustion Residues in Soil Amendments: Surface Coal Mining. En: *Coal Combustion By-Products Associated with Coal Mining Interactive Forum*. pp. 143-152.
- Leiros de la Peña, M. C., Gil Sotrés, F. Carballas Fernández, M., Codesido López C., González Sangregorio, M.V., Seoane Lavandeira, S. y Guitián Ojea, F. 1989. Recuperación edáfica de las escombreras de minas de lignito en Galicia. 1) Caracterización de los materiales estériles. *Anales de Edafología y Agrobiología*, 48, 85-100.
- Leirós de la Peña, M.C., Varela Martínez, C. Gil Sotrés, F. Trasar Cepeda, M.S. y Seoane Labandeira, S. 1995. Los suelos de la mina. En: F. Guitián Ojea (Ed.). *Recuperación de las escombreras de la Mina de Lignitos de Meirama (A Coruña)*. Univ. Santiago de Compostela- Lignitos de Meirama. pp. 125-158.
- Leirós, M.C., Gil-Sotrés, F., Trasar-Cepeda, M.C., Saá, A. and Seoane, S. 1996. Soil recovery at the Meirama opencast lignite mine in northwest Spain: a comparison of the effectiveness of cattle slurry and inorganic fertilizer. *Water, Air and Soil Pollution*, 91, 109-124.
- Li, R. S. and Daniels, W.L. 1994. Nitrogen Accumulation and Form over Time in Young Mine Soils. *Journal of Environmental Quality*, 23, 166-172.
- Limstrom, G.A. 1960. Forestation of strip mined land in the central states. *Agriculture Handbook*. No. 166, USDA. U. S. Government Printing Office, Washington, D. C.
- Lorenzo Agudo, J. 1991. *Impacto ambiental de la descubierta de ENCASUR en Puertollano. Problemas y soluciones*. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Geológica, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid. Inédito.
- Lyle Jr., E.S. 1980. Minesoil classification. In: Simpson D.G. y Plass, W.T. (Eds.) *Seminar of the Role of Overburden Analysis in Surface Mining*. Wheeling W.Va. Bureau of Mines Information Circular 8863. pp 38-51.
- Macías, F., Barral, M.T., Monterroso, C. y Calvo de Anta, R.M. 1992. Metales pesados en las escombreras de la Mina Puentes (La Coruña): Influencia de las condiciones Eh-pH. *Suelo y Planta*, 2(1), 139-150.
- Mc Rae. S.G. 1986. Restoration of Landfill sites. *Institute of Wastes Management 88th Annual Conference, Bournemouth*. 11 p.
- Monterroso, C., Álvarez, E. y Macías, F. 1993a. Caracterización de los suelos de la escombrera de la mina Puentes (A Coruña) en proceso de restauración ambiental. *Cuadernos del Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 18, 307-316.
- Monterroso, C., Álvarez, E. y Macías, F. 1993b. Macronutrientes y elementos traza en suelos de mina y especies vegetales desarrolladas sobre ellos. En: R. Ortiz Silla (Ed.). *Problemática Ambiental y Desarrollo. V Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio*. Sociedad española de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio. pp. 297-306.
- Opeka, T. and Morse, R. 1979. *Use of Green Manure Amendments and Tillage to Improve Minesoil Productivity*. (EPA. 600/7-791-257). Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VI. Industrial Environmental Research Laboratory. USEPA Cincinnati, OH. 84 p.
- Pedersen, T.A., Rogowski, A.S. and Pennock Jr., R. 1980. Physical Characteristics of Some Minesoils. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 321-328.
- Perry, E.F. 1998. Interpretations of Acid-Base Accounting. In: Brady, K. B. C., Smith, M.W. and Schueck, J. (Eds.). *Coal Mine Drainage Prediction in Pennsylvania*. The Department of Environmental Protection. Chapter 11, 27 p.
- Poch, R.M., Porta, J. y Boixadera, J. 1989. Erosión hídrica y rehabilitación de áreas mineras: Procesos, cuantificación e interés pedagógico. *XVI Reunión de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo*. DMCS-UPC & SECS, Lleida. Separata, 66 p.
- Ramsay, W.J.H. 1986. Bulk soil handling for quarry restoration. *Soil Use and Management*, 2(1), 30-38.
- Roberts, J. A., Daniels W.L., Bell, J.C. and Burger, J.A. 1988. Early Stages of Mine Soil Genesis in a Southwest Virginia Spoil Lithosequence. *Soil Science Society America Journal*, 52, 716-723.
- Rumpel, C. and Kögel-Knabner, I. 2002. The role of lignite in the carbon cycle of lignite-containing mine soils: evidence from carbon mineralisation and humic acid extractions. *Organic Geochemistry*, 33,393-399
- Sandoval, F.M., Bond, J.J., Power, J.F. and Willis, W.O. 1973. Lignite mine spoils in the Northern Great Plains: Characteristics and potential form reclamation. *Restoration and Applied Technology Symposium on Mined-Land Reclamation*, Pittsburgh, PA. pp. 117-133.
- Sandoval, F.M. and Power, J.F. 1977. Laboratory methods recommended for chemical analysis of mined-lands spoils and overburden in Western United States. U.S. Department of Agriculture, *Agriculture Handbook*, No. 525. 31 p.
- Schafer, W.M., Nielsen, G.A., Dollhopf, D.T. and Temple, K.L. 1979. *Soil genesis, hydrological properties, root characteristics, and microbial activity of 1- to 50-year-old strip-mine spoils* (EPA-600/7-79-100). Interagency

- Energy/Environment R&D Report. U.S. Govt. Printing Office, Washington, DC. 189 p.
- Sencindiver, J.C., Ammons, T. and Delp, C.H. 1978. Clasificación de minesoils—a proposed suborder. *11th Congress of International Society of Soil Science*. Edmonton Canada. Abstracts, nº 30.
- Sencindiver, J.C. and Ammons, J.T. 2000. Minesoil Genesis and Clasification. In: Barsnhisel, R.I., Daniels, W.L. and Darmody, R.G. (Eds.). *Reclamation of Drastically Disturbed Lands*. Agronomy Series No. 41. American Society of Agronomy. Madison, WI. 34 p.
- Seoane, S. y Leirós, M.C. 1992. Neutralización de la acidez de estériles de minas de lignito con cenizas de la combustión del carbón en centrales termoeléctricas según composición y propiedades ándicas. *III Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo*, septiembre de 1992, Pamplona. pp. 151-156.
- Seoane, S. and Leirós, M.C. 2001. Acidification-Neutralization Processes in a Lignite Mine Spoil Amended with Fly Ash or Limestone. *Journal of Environmental Quality*, 30, 1420-1431.
- Seoane, S., González, M. V., Gil, F., Leirós, M.C. y Guitián, F. 1991. Metales extraíbles (Cu, Co, Ni, Zn y Mn) en materiales estériles de minas de lignito de Galicia. *Suelo y Planta*, 1, 631-642.
- Seoane-Labandeira, S., Benito Rueda, E., Leirós de la Peña, M.C., Gil Sotrés, F. y Guitián Ojea, F. 1995. Los materiales estériles de la mina. En: F. Guitián Ojea (Ed.). *Recuperación de las escombreras de la Mina de Lignitos de Meirama (A Coruña)*. Univ. Santiago de Compostela-Lignitos de Meirama. pp. 69-98.
- Skousen, J.G., Simmons, J. and Ziemkiewicz, P. 2001. The Use of Acid-Base Accounting to Predict Post-mining Drainage Quality on West Virginia Surface Mines. En: *Eighteenth Annual Meeting of American Society for Surface Mining and Reclamation*, June 2001, Albuquerque, NM. pp. 437-447.
- Short, J.R., Fanning, D.S., McIntosh, M.S., Foss, J.E. and Patterson, J.C. 1986. Soils of the Mall in Washington, DC: II. Genesis, Classification, and Mapping. *Soil Science Society of American Journal*, 50, 705-710.
- Smith, R.M., Grube Jr., W. E., Arkle, T. and Sobek, A. 1974. *Mine spoil potentials for soil and water quality* (EPA-670/2-74-070). USEPA, Cincinnati, Ohio.
- Smith, R.M. and Sobek A.A. 1978. Physical and Chemical Properties of Overburdens, Spoils, Wastes, and New Soils. In: Sutton, P. (Ed.). *Reclamation of Drastically Disturbed Lands*. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin. pp. 149-172.
- Smith, R.M., Tryon, E.H. and Tyner, E.H. 1981. *Soil development on mine spoil. Agricultural Experimental. Station Bulletin*, 604 T. West Virginia University, Morgantom, WV.
- Sobek, A.A., Schuller, W.A., Freeman, J.R. and Smith, R.M. 1978. *Field and laboratory methods applicable to overburdens and minesoils* (EPA-600/2-78-054). US. Government Printing Office, Washington, DC. 203 p.
- Soil Survey Division Staff. 1993. *Soil Survey Manual*. Soil Conservation Service. U.S.D.A. Handbook 18.
- Soil Survey Division Staff. 2010. *Keys to Soil Taxonomy*, 11th ed. U.S.D.A.-Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C.
- Spangler, M.G. and Handy R.L. 1982. *Soil Engineering*. Harper and Row Publishers, New York.
- Thomas, K.A., Sencindiver, J.C., Skousen, J.G. and Gorman, J.M. 2000. Soil Horizon Development on a Mountaintop Surface Mine in Southern West Virginia. *Green Lands*, 30, 41-52.
- Urrutia, M.M., García Rodeja, E. and Macías, F. 1992. Sulfide Oxidation in Coal-Mine Dumps: Laboratory Measurement of Acidifying potential with H₂O₂ and Its Application to Characterize Spoil Materials. *Environmental Management*, 16(1), 81-89.
- Val Caballero, C. and Gil Bueno, A. 1994. Methodology for Monitoring Land Reclamation of Coal Mining Dumps. In: *International Land Reclamation and Mine Drainage Conference, and Third International Conference on The Abatement of Acidic Drainage*, April 1994, Pittsburgh. USDI, Bureau of Mines Special Publication (SP 06C-94), Vol. 3, 2-11.
- Vandevender, J.C. and Sencindiver, J.C. 1982. The Effects of Three Forms of Nitrogen Fertilizer, Phosphorus and Hydrated Lime on Abandoned Mine Land Reclamation. In: *1982' Symposium on Surface Mining Hydrology, Sedimentology and Reclamation*. Univ. Kentucky, Lexington, KY. pp. 497-502.
- Varela, C., Vázquez, C., González-Sangregorio, M.V., Leirós, M.C. and Gil Sotrés, F. 1993. Chemical and physical properties of opencast lignite minesoils. *Soil Science*, 156, 193-204.
- Whitford, W.G. and Elkins, N.Z. 1986. The Importance of Soil Ecology and the Ecosystem Perspective in Surface-Mine Reclamation. In: Reith, C.C. y Potter, L.D. (Eds.). *Principles and Methods of reclamation Science*. New Mexico Press, Albuquerque. pp. 151-187.
- Zeleznik, J.D. and Skousen, J.G. 1996. Survival of three tree species on old reclaimed surface mines in Ohio. *Journal of Environmental Quality*, 25, 1429-1435.

Recibido: noviembre 2010

Revisado: noviembre 2010

Aceptado: febrero 2011

Publicado: abril 2011

