



2.3

¿Cómo estudiar la estabilidad de agregados en suelos afectados por incendios? Métodos e interpretación de resultados

Jorge Mataix-Solera¹, Elena Benito², Vicente Andreu³, Artemi Cerdà⁴, Joan Llovet⁵, Xavier Úbeda⁶, Clara Martí⁷, Eufemia Varela², Eugenia Gimeno³, Vicky Arcenegui¹, José L. Rubio³, Julián Campo³, Fuensanta García-Orenes¹ y David Badía⁷

¹GEA (Grupo de Edafología Ambiental), Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente, Universidad Miguel Hernández, Avenida de la Universidad s/n, Elche, Alicante. jorge.mataix@umh.es

²Departamento de Biología Vegetal y Ciencias del Suelo, Facultad de Biología, Universidad de Vigo, Campus Lagoas-Marcosende, 36310, Vigo.

³Centro de Investigaciones sobre Desertificación-CIDE, CSIC-Universitat de València, Camí de la Marjal, s/n, Apdo. 46470 Albal, València.

⁴Departament de Geografia, Universitat de València, Blasco Ibáñez, 28, 46010, València.

⁵Fundación CEAM, Departament d'Ecologia (CEAM), Ciències Fase 5, Ap. 99, 03080, Alacant.

⁶Departament de Geografia Física i Anàlisi Regional, Facultat de Geografia i Història, Universitat de Barcelona, Montalegre, 6, 08001, Barcelona.

⁷Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza. Zaragoza, Ctra. de Cuarte, s/n 22071, Huesca.

¿Cómo estudiar la estabilidad de agregados en suelos afectados por incendios? Métodos e interpretación de resultados

Jorge Mataix-Solera¹, Elena Benito², Vicente Andreu³, Artemi Cerdà⁴, Joan Llovet⁵, Xavier Úbeda⁶, Clara Martí⁷, Eufemia Varela², Eugenia Gimeno³, Vicky Arcenegui¹, José L. Rubio³, Julián Campo³, Fuensanta García-Orenes¹ y David Badía⁷

¹GEA (Grupo de Edafología Ambiental), Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente, Universidad Miguel Hernández, Avenida de la Universidad s/n, Elche, Alicante. jorge.mataix@umh.es

²Departamento de Biología Vegetal y Ciencias del Suelo, Facultad de Biología, Universidad de Vigo, Campus Lagoas-Marcosende, 36310 Vigo.

³Centro de Investigaciones sobre Desertificación-CIDE, CSIC-Universitat de València, Camí de la Marjal, s/n, Apto 46470 Albal, València.

⁴Departament de Geografia, Universitat de València, Blasco Ibáñez, 28, 46010-València.

⁵Fundación CEAM, Departament d'Ecologia (CEAM), Ciències Fase 5, Ap. 99, 03080, Alacant.

⁶Departament de Geografia Física i Anàlisi Regional, Facultat de Geografia i Història, Universitat de Barcelona, Montalegre, 6, 08001-Barcelona

⁷Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza. Zaragoza, Ctra. de Cuarte, s/n 22071-Huesca.

RESUMEN

La estabilidad de agregados es una propiedad física relacionada con su resistencia a la ruptura cuando son sometidos a una determinada energía. Es una propiedad clave en el control y la gestión del agua en el suelo, influyendo en la infiltración, la escorrentía superficial y por tanto en la erosión. Esto la convierte en un parámetro de sumo interés para su análisis tras un incendio forestal. La estabilidad de agregados está altamente influenciada por la química y la biología del suelo y por tanto ha sido considerada por muchos investigadores como una propiedad informativa de la salud del suelo. Existen muchos métodos para estudiar la agregación del suelo y la estabilidad de los agregados, aportando todos ellos unos resultados cuyos valores siempre son relativos a la energía aplicada en cada procedimiento, y por tanto no siempre comparables. En este capítulo se realiza una revisión y se describen los principales métodos empleados para su estudio, y se destacan sus ventajas e inconvenientes cuando se emplean para el estudio de suelos quemados. Se resumen también los patrones más frecuentes de agregación encontrados en suelos quemados en diversos estudios realizados por diferentes grupos de investigación españoles, así como las interpretaciones de los resultados que se han encontrado. El principal objetivo de este capítulo es servir de referencia para futuros investigadores que continúen con esta línea de investigación. En el encontrarán las bases metodológicas para el estudio de la agregación del suelo, así como apuntes para la interpretación de sus resultados. La información aquí recogida podrá ayudar en la elección del método o los métodos más adecuados a los objetivos concretos y particularidades de los suelos objeto de un futuro estudio.

INTRODUCCIÓN

Los suelos ocupan un lugar privilegiado en los ecosistemas terrestres. Su posición como interfaz entre la atmósfera, la hidrosfera, la litosfera y la biosfera les da el rango de gestores. Por ello, cualquier alteración edáfica supone una alteración en el funcionamiento de los ecosistemas terrestres. A través de los suelos se filtran las aguas, en los suelos se inicia la transferencia de energía y materia en las cadenas tróficas, y en el suelo se intercambian los gases que determinarán la composi-

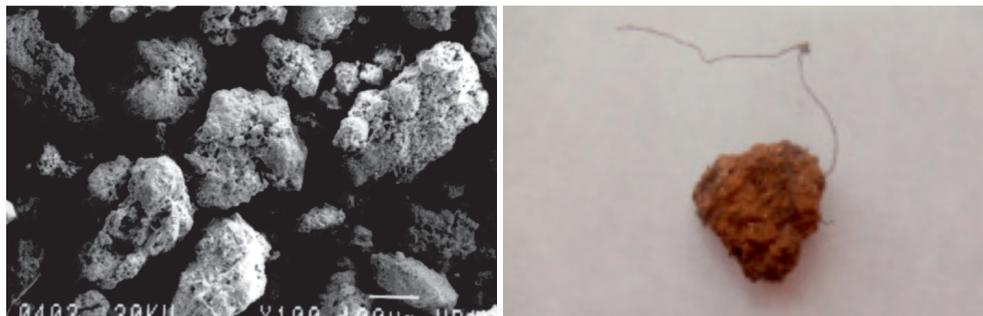


Figura 1. A la derecha, microagregados ($<0,25\text{ mm}$) observados mediante microscopía electrónica de barrido (Mataix-Solera et al., 2002). A la izquierda, macroagregado de unos 5 mm de diámetro. En ambos casos se trata de muestras de suelos forestales.

ción química del aire. De todas las propiedades de los suelos, la estructura es la que más influye en todos esos procesos hidrológicos, biológicos y atmosféricos. La estructura del suelo permite la aireación, el intercambio de cationes, el flujo de agua, en definitiva, la vida en el suelo. Y a su vez la actividad biológica le conferirá al suelo los procesos clave –como la descomposición de la materia orgánica– para influir en el sistema suelo y en el sistema terrestre.

Los incendios forestales provocan un súbito aumento de la temperatura, y un periodo sin o con escasa cubierta vegetal, que influirán en la estructura del suelo (Certini, 2005; Mataix-Solera y Guerrero, 2007). El aumento de la temperatura puede provocar cambios incluso en las propiedades de las arcillas, pero sobretodo da lugar a una alteración de la actividad biológica. La reducción de la cubierta vegetal dará lugar a cambios en el régimen térmico del suelo, y a que los procesos erosivos sean más intensos. Todo ello contribuirá a cambios en la estructura del suelo que son difíciles de cuantificar al ser ésta altamente compleja, un mundo entre lo biótico y lo abiótico, y también porque se han producido alteraciones del suelo que desconocemos.

Se entiende por agregado del suelo a cualquier asociación estable de partículas individuales de igual o diferente naturaleza. Los agregados son fruto de la organización de las partículas minerales y orgánicas que forman el suelo. Los fenómenos de floculación de coloides dan lugar a la precipitación conjunta de partículas coloidales, que a partir de esa precipitación pueden quedar asociadas de forma más o menos estable dando lugar a unos agregados (inicialmente microagregados, $<0,25\text{ mm}$), que posteriormente pueden evolucionar dando lugar a agregados de mayor tamaño (macroagregados, $>0,25\text{ mm}$; Figura 1), y definen la estructura del suelo. En las formación de las unidades de fábrica de menor tamaño (cluster y dominios), los enlaces inorgánicos son los más importantes, mientras que en la estabilización de agregados lo son los enlaces orgánicos (cementos húmicos).

Tal y como hemos indicado, tanto componentes de la fracción inorgánica del suelo como de la orgánica influyen en la formación de agregados y su estabilización. El contenido en arcillas y la mineralogía de éstas; a través de las fuerzas de atracción y cohesión entre ellas (Singer, 1994), los microorganismos; uniendo las partículas por mecanismos de adsorción, segregando productos mucilaginosos y envolviendo partículas, e indirectamente a través de su

intervención en la evolución de la materia orgánica, son todos ellos factores que influyen en esta formación (Harris et al., 1964; Insam y Domsch, 1988). La cantidad y calidad de la materia orgánica son factores fundamentales que controlan la agregación de partículas (Oades, 1993). El complejo arcillo-húmico será tanto más estable cuanto más polimerizados estén los ácidos húmicos. En medios biológicamente activos y ricos en bases, la polimerización da lugar a moléculas de gran tamaño, se forman complejos insolubles y agregados estables con un importante espacio de huecos entre ellos, típico de humus de tipo mull, característico de epipedión móllico y en menor medida de ócrico.

La acción floculante de determinados cationes juega también un papel importante en la estructura del suelo. El calcio, el hierro y el aluminio favorecen la formación de agregados estables (Porta et al., 2003), particularmente los cationes divalentes asociados a arcillas, mientras que por ejemplo el ión sodio favorece la dispersión de las mismas. En suelos calcáreos el carbonato cálcico actúa de agente estabilizante. Los óxidos de hierro actúan a modo de película adherente entre las superficies de las arcillas y también como partículas discretas cargadas, en el caso de muchos suelos ácidos, fuertemente meteorizados. Los enlaces se establecen al precipitar estos minerales entre las partículas. La unión con los grupos funcionales de la materia orgánica puede deberse a puentes de hidrógeno y a fuerzas electrostáticas. En la formación de macroagregados interviene en mayor medida la acción de las raíces de las plantas, microorganismos, especialmente hongos (Figura 2), cuyo micelio actúa positivamente en la agregación (Roldán et al., 1994a), y en general, componentes orgánicos del suelo, como por ejemplo los carbohidratos ya que se comportan como agentes cementantes (Benito y Díaz-Fierros, 1992; Lax y García-Orenes, 1993).

La estabilidad de agregados hace referencia a la resistencia que tiene el suelo para mantener su propia estructura al estar los agregados sometidos a fuerzas externas, en concreto las derivadas de humectación, impacto de gotas de lluvia o paso de agua, o un determinado proceso dispersivo. Por ello, esta medida puede utilizarse como un indicador de la estructura y de la estabilidad física del suelo. De hecho, ha sido utilizada como parámetro indicativo de la alteración del ecosistema suelo, y de la erosionabilidad desde los años 40 (Imeson, 1984).

La agregación del suelo puede variar a lo largo de determinados periodos de tiempo, tales como una estación o un año. Los agregados pueden formarse, desintegrarse y reagregarse periódicamente (Hillel, 1998). La destrucción de agregados es el primer paso hacia el desarrollo de costras y sellado superficial, los cuales limitan la infiltración del agua e incrementan la erosión potencial del suelo. El sellado del suelo se puede producir como consecuencia de la rotura de los agre-

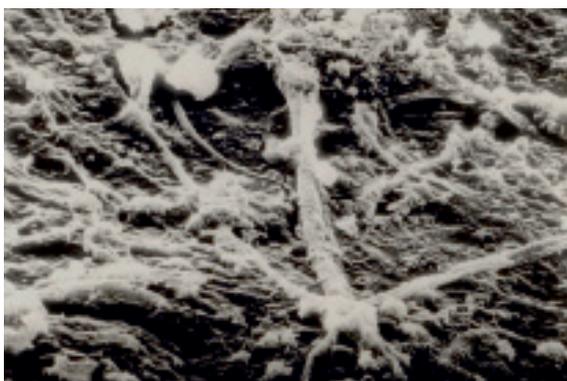


Figura 2. Microfotografía al microscopio electrónico de barrido de los macroagregados de un suelo forestal donde se observa la fina red de raíces e hifas de hongos que unen las partículas del suelo (2500 aumentos) (Benito y Díaz-Fierros, 1992).

gados por el impacto de las gotas de lluvia, la salpicadura y la compactación de la superficie del suelo, si éste presenta una estructura pobre y una baja estabilidad de agregados (Epstein y Grant, 1973; Poesen y Savat, 1981; Hoogmoed y Stroosnijder, 1984). Además, los agregados de pequeño tamaño pueden ser erosionados, aún sin sufrir dispersión por el agua (Bryan, 1968).

El porcentaje de agregados estables y su distribución por tamaños son los parámetros más empleados indicativos de la estabilidad de la estructura y su nivel de resistencia a los factores externos (Jaiyeoba y Ologe, 1990).

Como hemos visto, en el proceso de agregación intervienen factores abióticos (mineralogía de las arcillas, textura o humedad) y biológicos, tanto animales como vegetales. El que tanto el mundo biológico como el mundo abiótico del suelo intervenga en la agregación del suelo es lo que determina la complejidad del estudio de la estructura del suelo, pero también lo que lo convierte en un parámetro clave para determinar la calidad y las funciones del suelo. La agregación del suelo será por lo tanto un parámetro sintético de la salud del suelo.

Tras el fuego se producen cambios dramáticos en la superficie del suelo (Certini, 2005), pero en profundidad el aumento de la temperatura es reducido. A pocos centímetros de profundidad ya no se suelen observar cambios sustanciales en el aumento de la temperatura. Sin embargo, los cambios que se producen en la superficie pueden desencadenar procesos de degradación que afectarán a los horizontes localizados a más profundidad. Y en ocasiones, las tasas de erosión postincendio son tan intensas que algunos centímetros del suelo son removidos, con lo que horizontes localizados habitualmente en profundidad quedan expuestos a la atmósfera (Mataix-Solera y Cerdà, 2009). Este capítulo muestra como se han abordado los estudios de los cambios en la agregación del suelo tras los incendios forestales. Se revisan y describen los principales métodos de estudio de la agregación del suelo y se presentan ejemplos de los estudios realizados resumiendo los resultados más relevantes encontrados en un tema de investigación que, por su complejidad ha estado considerado por algunos autores un campo entre la ciencia y el “arte”.

MÉTODOS PARA EL ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD DE AGREGADOS

Existen diferentes métodos para medir la agregación del suelo, algunos están enfocados hacia la distribución de los agregados por tamaños (A) y otros hacia la estabilidad de los mismos (B y C).

La estabilidad de los agregados es una propiedad compleja y no existe un acuerdo general sobre el método analítico más apropiado para su determinación (Bryan, 2000). Por ello, en la bibliografía se encuentra un gran número de metodologías y técnicas diferentes para medir la estabilidad de los agregados y su distribución por tamaños. Entre otras, las más ampliamente utilizadas son: tamizado en seco (Chepil, 1962; Kemper y Rosenau, 1986), tamizado en húmedo (Yoder, 1936; Van Bavel, 1952; Low, 1954; Kemper y Rosenau, 1986; Amezketa et al., 1996; Le Bissonnais, 1996), el test del impacto de la gota de agua (McCalla, 1944; Low, 1954; Farrés, 1980; Bergsma y Valenzuela, 1981; Imeson y Vis, 1984), rotura o desagregación mediante ultrasonidos o sonicación (North, 1979; Imeson y Vis, 1984; Holz et al., 2000), y también, tests de laboratorio basados en la rotura de los agregados mediante simulación de lluvia (Benito et al., 1986; Ternan et al., 1994; Loch y Foley, 1994; Roldán et al., 1996; Martínez-Mena et al., 1998).

Uno de los grandes problemas de esta determinación es que los resultados no son valores absolutos -como lo puede ser el contenido de materia orgánica de un suelo, por ejemplo- sino que son relativos a la energía empleada por el método. Por tanto, los resultados de la estabilidad de agregados realizados por distintos métodos no son comparables. La elección del método más adecuado es por tanto labor del investigador, teniendo en cuenta los objetivos de la investigación y también el tipo de suelo a estudiar.

A continuación se hace una descripción de los métodos más empleados para el estudio de la agregación del suelo y su estabilidad.

Distribución de agregados por tamización en seco (Kemper y Rosenau, 1986)

Se pesan 50 g de suelo seco al aire y tamizado por tamiz de 10 mm de abertura de malla y se colocan sobre un tamiz de 5 mm, situándose por debajo tamices de 2, 1, 0,25 y 0,05 mm y se tamiza el conjunto durante 2 minutos. A continuación se pesa el suelo que queda en cada tamiz y se calcula el % de agregados de cada una de las fracciones así como el diámetro medio ponderado según la expresión propuesta por Kemper y Rosenau (1986):

$$DMPs = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i \cdot w_i \quad [1]$$

donde \bar{x}_i es el diámetro medio de cada fracción (mm) y w_i es el porcentaje de agregados de cada tamiz con respecto al suelo total (expresado en tanto por uno).

Los cambios observados en la distribución de los agregados por tamización en seco en un suelo quemado en comparación con la distribución observada en el mismo suelo no quemado permite analizar el efecto del calor en el tamaño de los agregados.

Métodos de estabilidad de los agregados que emplean agua como agente disgregante

Dentro de los métodos que se utilizan para el estudio de la estabilidad de los agregados al agua se puede considerar un primer grupo de métodos que analizan el efecto disgregante del agua con una acción mecánica. Dentro de este grupo se incluirían los métodos de tamización en húmedo (B1), los test de impactos de gotas (B2) y el empleo de simuladores de lluvia (B3). Otro grupo de métodos para determinar la estabilidad de los agregados al agua incluiría aquellos que miden la dispersión de la arcilla en agua (B4), entre los que se pueden citar la relación de dispersión de Middleton (1930), que mide la proporción de arcilla y limo que se dispersa en agua, expresada como porcentaje de la que se obtiene después de la dispersión completa del suelo con hexametafosfato sódico y el test de coherencia al agua de Emerson (1967).

Métodos basados en la tamización en húmedo

Los métodos basados en la tamización en húmedo son de los más empleados y entre ellos el más utilizado es el derivado del propuesto por Yoder (1936). Este método consiste en medir la cantidad de agregados que permanecen intactos después de que la muestra de suelo se somete a la acción de fuerzas mecánicas por tamización en húmedo. Sin embargo las variantes de este método son muy amplias. Unos utilizan métodos con múltiples tamices, otros con un único tamiz, varía la cantidad de muestra utilizada, el tipo de movimiento del tamizador, la frecuencia de las

oscilaciones y el tiempo de duración del tamizado. Esto hace muy difícil la comparación de los resultados de los diferentes estudios.

Un test de estabilidad estándar para medir los macroagregados estables al agua fue propuesto por Kemper y Koch (1966a) y posteriormente mejorado por Kemper y Rosenau (1986). Se describe a continuación el protocolo de este método.

Test de tamización en húmedo 1 (Kemper y Koch, 1966a)

Se pesan en tamices de luz de malla de 0,25 mm (tamaño que separa los macroagregados de los microagregados, según Oades, 1984) 4 g de agregados entre 2 y 1 mm y se pre-humedecen por saturación con vapor de agua o por capilaridad durante aproximadamente 12 horas, con la finalidad de evitar la desagregación durante el humedecimiento. Los

tamices se colocan en el tamizador sobre unos vasos llenos de agua y se someten a un movimiento vertical (recorrido de 1,3 cm) durante 5 minutos con una frecuencia de 35 veces por minuto. Tras la tamización los vasos contienen los agregados que son inestables. Se llevan a la estufa a 105 °C hasta que el agua se haya evaporado y se pesan para obtener la fracción de agregados inestables (M_{AI}). Sobre el tamiz permanecen los macroagregados que son estables, con la excepción de las partículas de arena demasiado grandes para pasar por el tamiz (y fragmentos de raíces). Para determinar estas últimas se dispersa el suelo que permanece en el tamiz con un agente dispersante como el hexametáfosfato sódico, aunque para suelos forestales con elevados contenidos de materia orgánica podría no ser suficientemente eficaz y se recomienda el uso de pirofosfato sódico o una sonda de ultrasonidos y se tamiza a través de un tamiz de 0,25 mm, recogiendo en una cápsula las arenas retenidas en el tamiz. Se llevan a la estufa a 105°C y se pesan. La fracción de agregados estables (M_{AE}) se calcula restando al peso inicial de agregados (4 g) la fracción de agregados inestables (M_{AI}) y las partículas de arena > 0,25 mm.

El cociente entre la fracción de agregados estables y la fracción total de agregados (agregados estables + agregados inestables), da un índice de la estabilidad de los agregados (AE). Los resultados se expresan en %.

$$\% AE = \frac{M_{AE}}{M_{AE} + M_{AI}} \times 100 \quad [2]$$

Respecto a la interpretación de resultados obtenidos con este método se propone la siguiente escala (Tabla 1).

Es importante que la temperatura del agua para el tamizado en húmedo esté comprendida entre 22° y 25°C, ya que se ha observado que la estabilidad decrece cuando la temperatura del agua

Tabla 1. Interpretación de los valores de estabilidad estructural del suelo, según el método de tamizado en húmedo de Kemper y Koch (1966b). El equipo necesario para su realización es comercializado por Eijelkamp.

% Agregados estables	Interpretación
80-100	Agregados muy estables
60-80	Agregados estables
40-60	Agregados moderadamente estables
20-40	Agregados poco estables
0-20	Agregados muy poco estables

usada está fuera de dicho intervalo (Kemper et al., 1985). Durante el tiempo de aplicación del método hay que intentar que todos los agregados estén cubiertos por agua. Si alguno queda flotando en la superficie habrá que intentar sumergirlo con gotas de agua usando un pulverizador (Murer y Kandeler, 1993). La estabilidad estructural aumenta tal y como transcurre el tiempo de almacenaje de la muestra de suelo; se recomienda no superar las tres semanas entre el muestreo del suelo, secado, tamizado y análisis con el fin de que las determinaciones sean comparables (Kemper y Koch, 1966b; Murer y Kandeler, 1993).

Test de tamización en húmedo 2 (Le Bissonnais, 1996)

Le Bissonnais (1996) propuso una metodología para unificar la medida de la estabilidad de los agregados, incluyendo los aspectos más interesantes de los métodos preexistentes. El método propuesto es una modificación del método de Hénin et al. (1958), ampliamente utilizado en suelos españoles, e incluye diversos aspectos de otros métodos como el de Yoder (1936) y el de Kemper y Rosenau (1986). Propone utilizar como medida de la estabilidad de los agregados el diámetro medio ponderado (DMP) de los agregados que permanecen estables después de aplicar tres tratamientos con diferentes niveles de energía y tras la tamización en húmedo utilizando etanol. Los tres tratamientos aplicados sobre 5 g de agregados con diámetros comprendidos entre 5 y 3 mm son humectación rápida con agua, agitación después de la prehumectación de los agregados con etanol y humectación lenta con agua. Este método permite diferenciar distintos mecanismos de ruptura de los agregados.

El primer tratamiento de humectación rápida, permite analizar el comportamiento de materiales terrosos secos sometidos a humectaciones bruscas y repentinas, como ocurre después del riego por inmersión o por lluvias intensas tras periodos secos, y mide la ruptura de los agregados debido al estallido producido por el aire que queda atrapado en el agregado durante la humectación.

Un segundo tratamiento de desagregación mecánica por agitación tras la prehumectación permite simular, de forma aproximada, el comportamiento de materiales húmedos en condiciones típicas de períodos invernales con lluvias persistentes. Se efectúa tras una humectación previa en etanol, que tiene por objetivo evaluar la cohesión de materiales en estado húmedo, independientemente de la compresión del aire atrapado (estallido). Dicha humectación se realiza con un líquido no polar y miscible con el agua, como es el etanol, muy adecuado al permitir por una parte controlar la desagregación y por otra limitar la reagregación de las partículas durante el secado.

Un tercer tratamiento de humectación lenta por capilaridad, que permite verificar el comportamiento de materiales húmedos bajo lluvias de baja intensidad. Este tratamiento es menos destructivo que la humectación rápida y mide la ruptura de los agregados independientemente del estallido.

Una vez realizados los tratamientos, se procede a la tamización en húmedo con un tamiz de 0,05 mm sumergido en etanol mediante el aparato de Hénin o de Yoder y posteriormente la fracción > 0,05 mm, una vez desecada a 105°C, se tamiza en seco con una columna de seis tamices: 2; 1; 0,5; 0,2; 0,1 y 0,05 mm. Los resultados se pueden expresar en forma de histogramas

representando la distribución de tamaño de partículas para cada uno de los tratamientos o bien como diámetro medio ponderado (DMP).

El protocolo completo del método original propuesto por Le Bissonnais se puede consultar en Le Bissonnais y Le Souder (1995); Le Bissonnais (1996) y Le Bissonnais y Gaillard (1997).

Test de tamización en húmedo 3 (Le Bissonnais y Gaillard (1997)) modificado parcialmente por Taboada (2001), aplicado en suelos quemados de Galicia (Varela, 2007).

En los tres tratamientos que se describen a continuación se parte de 5 g de agregados de diámetros comprendidos entre 5 y 3 mm seleccionados manualmente para evitar, en la medida de lo posible, la presencia de gravas. Las condiciones de humedad en el momento de iniciarse el tratamiento han de ser idénticas, por lo que previamente al ensayo se mantienen los agregados en la estufa a 40°C durante 24 horas.

Los tratamientos consisten básicamente en la combinación de una humectación y de una acción mecánica con niveles de energía variables. La humectación se realiza colocando los agregados directamente sobre agua (1^{er} tratamiento), sobre etanol (2^o tratamiento) o bien colocándolos sobre un papel de filtro situado sobre arena saturada de agua para que los agregados se humedezcan lentamente por capilaridad (3^{er} tratamiento). Un resumen del protocolo del método se presenta en la figura 3.

Las muestras, una vez aplicado el tratamiento, se secan en la estufa a 40°C y se tamizan con el objetivo de separar las fracciones por tamaños (5-2, 1-2, 0,5-1, 0,25-0,5, 0,1-0,25, 0,25-0,1, 0,1-0,05 y <0,05 mm).

Los resultados se pueden expresar en forma de histogramas representando la distribución de tamaño de partículas para cada uno de los tests o bien como diámetro medio ponderado de acuerdo con la expresión propuesta por Kemper y Rosenau (1986):

$$DMP_h = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i \cdot w_i \quad [3]$$

donde: \bar{x}_i es el diámetro medio de cada fracción (mm) y w_i es el porcentaje de agregados estables de cada tamiz con respecto al suelo total.

La tabla 2 muestra la propuesta de Le Bissonnais (1996) para clasificar los suelos según los valores del DMP_h. Esta clasificación puede aplicarse a cada uno de los tratamientos o al valor medio de los tres tratamientos.

Test de tamización en húmedo 4 (Van Bavel ,1952; Low ,1954)

Tabla 2. Clases de estabilidad y valores de DMP_h según Le Bissonnais (1996).

Clase	DMP _h (mm)	Estabilidad agregados
1	< 0,4	Muy inestable
2	0,4-0,8	Inestable
3	0,8-1,3	Media
4	1,3-2,0	Estable
5	> 2,0	Muy estable

En un vaso de precipitados se colocan 50 g de suelo (agregados entre 3,35-5 mm diámetro) y se cubren con 100 mL de agua destilada. Se dejan en reposo durante 30 minutos. Se monta una batería de tamices (2; 1; 0,5; 0,250 y 0,106 mm de luz de malla). A continuación se transfiere la mezcla de suelo y agua al centro del tamiz superior. La

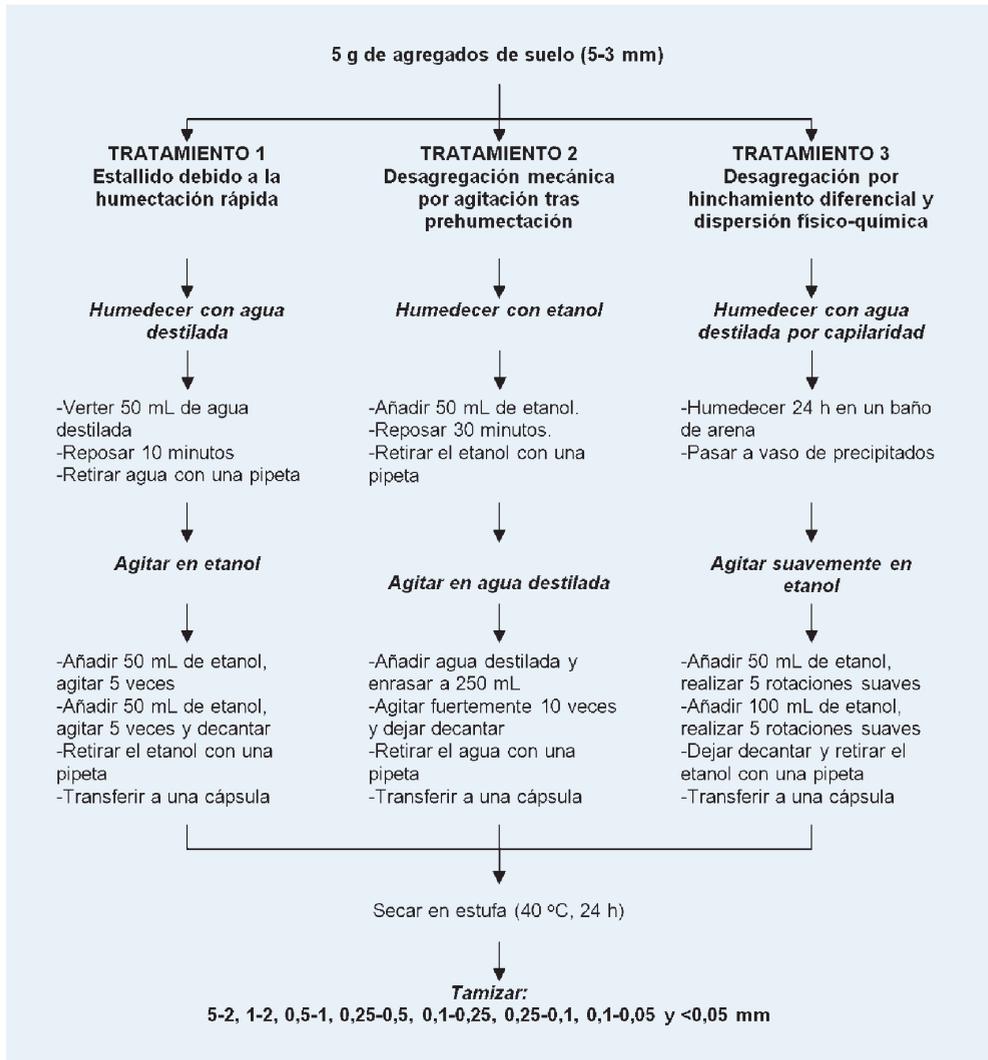


Figura 3. Esquema del test de Le Bissonnais y Gaillard (1997) modificado por Taboada (2001).

muestra se tamiza en húmedo empleando un aparato especial lleno de agua destilada que realiza un movimiento ascendente-descendente de los tamices, durante 17 minutos (lo que supone una tasa de 30 inmersiones por minuto). Tras la agitación, el material retenido en cada uno de los tamices se transfiere a un recipiente, se seca en estufa a 105 °C hasta que el peso es constante (48 h suele ser suficiente) y se pesa (m_1). Posteriormente el material se dispersa mediante humectación y presión, se lava a través de un tamiz de 0,5 mm de malla, se seca en estufa a 105 °C durante 48 h y finalmente se pesa para determinar la presencia de partículas gruesas (m_2). Este valor se

resta de m , para obtener los agregados de diámetro mayor de 0,5 mm estables al agua. Se realizan 6 repeticiones de cada muestra tomándolas aleatoriamente.

Test de tamización en húmedo 5 (Hénin y Feodoroff, 1958)

Se utiliza una nueva modificación del método de Hénin y Feodoroff (1958) modificado, tomado de Primo y Carrasco (1973), en la que se utiliza la dispersión química por tratamiento con agua oxigenada. El suelo se pasa por un tamiz de 2 mm de luz, se somete a humedecimientos bruscos y agitación en medio acuoso mediante un aparato diseñado especialmente para tal fin; se pesa el conjunto de agregados estables más la fracción arena. Posteriormente se destruyen los agregados estables mediante oxidación de la materia orgánica con agua oxigenada y, a continuación, se determina el contenido de arena de dicho conjunto. Por diferencia se calcula el porcentaje de peso de suelo correspondiente a los agregados estables.

Un crítica de la técnica del tamizado en húmedo para la determinación de los agregados estables al agua es que ésta no simula adecuadamente el proceso de cómo ocurre la rotura de los agregados en el campo. En condiciones naturales, los suelos no son sometidos a una completa inmersión y agitación en agua, como se realiza con el tamizado en húmedo. Por ello, muchos investigadores miden la rotura de los agregados sometidos al impacto de las gotas de lluvia, como un método alternativo para determinar su estabilidad. Esta metodología permite controlar variables experimentales como la intensidad de la lluvia, su duración y su energía cinética.

Métodos que emplean impactos repetidos de gotas de agua sobre agregados individuales

En 1954, Low determinó la estabilidad de los agregados basándose en su respuesta frente al impacto de gotas de agua. A partir de 1965 se han utilizado diversos simuladores de lluvia en España para medir el impacto de las gotas de lluvia en la estabilidad de los agregados (Guitian y Méndez, 1965; Benito et al., 1986; Roldán et al., 1996).

Estos métodos tienen la ventaja frente al test de tamización en húmedo que permiten cuantificar con mayor exactitud la energía aplicada y sobre todo el modo de actuación de la misma, reflejando mejor las condiciones de destrucción de los agregados que se producen en la superficie del suelo. Debido a ello, los simuladores de lluvia, orientados inicialmente hacia el estudio de la erosión hídrica, se emplean también en la actualidad en la medida de la estabilidad de los agregados al agua. La principal desventaja de la simulación de lluvia es la falta de estandarización, lo que dificulta la comparación de los resultados obtenidos en los diferentes estudios.

Test del impacto de la gota de agua (CND, Counting the Number of Drop-impacts; Low, 1954)

El método original fue propuesto por Mc Calla (1944) y posteriormente modificado por Low (1954). Utilizar un golpeteo repetitivo de gotas sobre el mismo agregado permite incrementar progresivamente la energía aplicada sobre el agregado. Se han propuesto distintos test siguiendo esta idea, si bien fue el profesor Imeson de la Universidad de Amsterdam quien desarrolló un test sencillo que permitía cuantificar la estabilidad de los agregados y discernir qué muestras eran más inestables.



Figura 4. Equipo empleado para los Test CND (Counting the Number of Drop-impacts) y TDI (Ten Drops Impacts). Foto: Artemi Cerdà, Ámsterdam, 1991. A la izquierda, el tubo (200 mm) por el que caen las gotas y que permite que impacten sobre el mismo punto al evitar las corrientes de viento. Y a la derecha, recipiente con los agregados preparados a pH 1.

Se recomienda que los agregados se seleccionen con cuidado, evitando golpes y aplastamientos durante el muestreo, el transporte, el tamizado y manejo posterior en el laboratorio. En estos test se suele utilizar un tamaño de agregados manejable (4-4,8 mm) que permite su manipulación individual. Es recomendable duplicar las muestras ya que el test se aplica en seco y en húmedo.

Conseguir que el impacto de una gota se produjese sobre un mismo agregado fue el primer problema que se tuvo que solucionar en este método. Y determinar cuándo se había roto o disgregado el agregado, el segundo. El primer problema se solucionó con una pipeta de caudal continuo que formaba gotas de 0,1 g de peso colocada a 1 m de altura (energía cinética del impacto $9,8 \times 10^3$ ergs). Para evitar las turbulencias del aire que pudiesen modificar la trayectoria de la gota en su caída, y por lo tanto fuese difícil que impactase sobre el agregado reiteradamente, se hace caer la gota sobre el agregado a través de un tubo de PVC de 20 mm de diámetro (Figura 4). De esta forma se evitaban también las corrientes de aire siempre presentes en un laboratorio. La segunda cuestión, la de determinar el momento de la rotura del agregado, se solucionó depositando el agregado sobre un tamiz de 2,8 mm de luz, cuando el agregado, tras repetidos impactos de gota, se desmoronaba y pasaba a través del tamiz se detenía la cuenta de los impactos de gota recibidos. Se repite la misma operación pero con el agregado humedecido por capilaridad para determinar el efecto de la humedad en la estabilidad de los agregados.

En general los test con impacto de gotas son sencillos, pero muy laboriosos. Se debe intentar que el impacto de las gotas se produzca entre 1 y 2 segundos para que el efecto más importante sea el golpe de la gota y no la dispersión por el contacto con el agua.

Se suelen utilizar 20-25 agregados por muestra, secados al aire, lo que supone por cada agregado el 4-5% de toda la muestra. Es posible utilizar más agregados, pero no se recomienda disminuir el número debido a la variabilidad en la respuesta dentro de la misma muestra. Se aconseja tomar notas de la forma en la que se produce el desmoronamiento o rotura del agregado. Por ejemplo, si hay raíces que mantienen el agregado unido, si se rompe en microagregados, o bien

se van desgranando las partículas, si se aprecia dispersión o turbidez en el agua que queda en el tamiz. Es por lo tanto una labor que puede parecer tediosa pero que es apasionante ya que de estas apreciaciones surge el conocimiento de cómo están formados los agregados y cómo se degradan.

Los resultados se expresan como porcentaje en peso de agregados estables. Cada agregado es sometido al impacto de gotas hasta que se destruye. Se contabiliza el número de impactos de gota hasta 100 gotas. Se considera que el agregado es muy estable si permanece sin deshacerse tras 100 impactos de gotas (Imeson y Vis, 1984), y tanto menos estable cuanto menor es el valor del CND. Se distingue entre los húmedos a pF1 y los secos. Algunos autores contabilizaron hasta 200 gotas de impactos para determinar la estabilidad de los agregados (Cerdà, 1993), si bien no se encontraron diferencias substanciales respecto a mantener la cuenta de impactos de gota hasta 100.

Para evaluar la estabilidad estructural de los agregados pueden utilizarse diferentes parámetros del test CND. El número medio de impacto de gotas es uno de ellos, pero dado que hay agregados que resistan los 200 impactos de gotas se suele utilizar más el NDI50 que hace referencia al 50% de la muestra que resiste el impacto de las gotas.

Test del impacto de diez gotas de agua (TDI, Ten Drops Impacts; Imeson y Vis, 1984)

Empleando el mismo equipo, altura de caída de gota, y tamaño de agregados que para el test CND, el test TDI (Ten Drop Impacts) -el cual podría ser considerado una variante del mismo- consiste en que cada agregado sufra el impacto de diez gotas. Después se cuantifica el peso del agregado superviviente y de la muestra que como consecuencia del impacto de las diez gotas fue arrastrada a través del tamiz de 2,8 mm. Se utiliza la media de 20 agregados por muestra.

Métodos que emplean simulaciones de lluvia

Test de simulación de lluvia 1 (Benito et al., 1986)

El simulador de lluvia consta de una boquilla pulverizadora fija marca Matabi, modelo super, dispuesta a 2 m de altura de la muestra de suelo y con un interceptor del flujo de caída que gira a una velocidad de 60 r.p.m. La intensidad de lluvia aplicada es de 45 mm h⁻¹ y la energía cinética de 13,6 J m⁻² mm⁻¹.

El protocolo es el siguiente: se colocan 50 g de suelo tamizado a 2 mm en tamices de 15 cm de diámetro y 0,25 mm de malla y se humedecen por capilaridad aproximadamente 12 horas. Los agregados se someten a la lluvia simulada durante 30 minutos. Se recoge el suelo que pasa a través del tamiz y una vez decantado se seca en estufa a 105 °C hasta alcanzar un peso estable. Los resultados se pueden expresar como pérdida de suelo en g m⁻² min⁻¹ que podría considerarse una medida de la erosionabilidad del suelo o bien como % de agregados estables. Para ello es necesario dispersar con hexametáfosfato sódico la fracción de agregados que permanece en el tamiz para conocer la cantidad de partículas de arena con diámetro superior a 0,25 mm.

$$AE\% = 100 \times (A - B) / (P - B) \quad [4]$$

donde AE% = agregados estables (% p/p), A: peso de los agregados estables + partículas de arena > 0,25 mm (g), B: partículas de arena > 0,25 mm (g) y P: peso de la muestra (g)

Test de simulación de lluvia 2 (Roldán et al., 1994b, basado en Benito et al., 1986)

Este método fue desarrollado y puesto a punto en el Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura, CEBAS-CSIC de Murcia por Antonio Lax en 1991. Está basado en el Método de Benito et al. (1986). Con este método se valora el efecto de la energía destructiva del agua, en forma de lluvia (García-Orenes, 1992). Se basa en suministrar un volumen determinado de agua en forma de gotas “lluvia artificial” de energía conocida (Benito et al., 1986; García-Orenes, 1992) sobre la muestra de suelo. Con este método se produce una ruptura mecánica de los agregados del suelo por el impacto de las gotas de agua.

En este método se utiliza un simulador de lluvia de laboratorio construido con un recipiente de PVC de 14 cm de altura, con un diámetro de 7,2 cm y abierto en su parte superior. Las gotas -de 1,6 mm de diámetro- se generan con agua destilada a partir de 11 boquillas de pipetas automáticas y se dejan caer desde una altura de 1 m sobre los agregados dispuestos homogéneamente sobre un tamiz de 0,25 mm de luz, humectados previamente por pulverización (Figura 5). La energía cinética de la lluvia por metro cuadrado es de 270 J m⁻², calculado tras la calibración del equipo (García-Orenes, 1992; 1996). El protocolo es el siguiente: se pesan 4 ± 0,01 g de agregados de suelo (P) correspondiente a la fracción del suelo comprendida entre 4 y 0,25 mm, aunque algunos autores han empleado otras fracciones (siempre > 0,25 mm). Se coloca y extiende uniformemente sobre un tamiz de 0,25 mm de luz seco. El suelo se humedece con agua destilada mediante pulverización y al cabo de 10 minutos, los agregados se someten a lluvia simulada desde 1 m de altura durante aproximadamente 1 minuto. El volumen total de agua en forma de lluvia es de 150 mL. La muestra de suelo que resiste la lluvia y queda en el tamiz, se pasa mediante lavado con agua destilada a una capsula de porcelana previamente tarada (T). Se seca a 105°C, se enfría y se vuelve a pesar (A). Se humedece el contenido de la capsula llenándola con agua destilada. Posteriormente los agregados que han resistido la lluvia se rompen con la ayuda de una varilla de vidrio y se vuelve a pasar por el tamiz de 0,25 mm, esta vez ayudándose de una varilla y chorro de agua a presión realizándose lavados a través del tamiz. El material que queda en el tamiz (arenas, gravas y materia vegetal) se pasa mediante lavado con agua destilada de nuevo a la cápsula de porcelana, se seca a 105°C y se pesa (B). El resultado se expresa como el porcentaje de agregados estables a una lluvia de energía conocida respecto a los agregados totales del suelo entre 0,25 y 4 mm:

$$AE\% = 100 \times (A-B) / (P + B + T) \quad [5]$$

donde AE% = agregados estables (% p/p), T: peso de la cápsula, A: peso de la cápsula + peso de agregados de suelo que ha resistido la lluvia, B: peso de la cápsula + arenas y material vegetal separado de los agregados de suelo que han resistido la lluvia y P: Peso de agregados de suelo en gramos utilizado.

Para interpretar los resultados de estabilidad obtenidos con este método, se recogen los rangos establecidos en el trabajo de Ramos y Nacci (1997). Los rangos en que dividen los valores de estabilidad se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Interpretación de los valores de estabilidad de agregados (basado en Ramos y Nacci, 1997).

Clase o nivel de estabilidad	AE (%)
Elevada	>75
Media	50-60
Baja	< 50



Figura 5. Simulador de lluvia empleado para el estudio de la estabilidad de agregados. Foto: J. Mataix-Solera, 2005.

Test de simulación de lluvia 3

Este método emplea un simulador de lluvia presurizado con boquilla fija desarrollado en la Universidad de Cranfield, Silsoe. La boquilla es Lechler 460.848.30.CE, que trabaja a 103,425 KPa y se localiza a 2 m de altura sobre la zona de trabajo. Es imprescindible calibrar el simulador de lluvia para asegurar una uniformidad espacial y temporal de la intensidad de la lluvia, la distribución del tamaño de gotas y de su energía cinética (KE). Se ha restringido a un área de 1,20 m² dentro del área basal de total cobertura de 2,5 m². Dentro del área de trabajo de 1,20 m², se emplea una cuadrícula de 20 × 20 cm para obtener un total de 30 puntos de calibración.

La intensidad de lluvia se determina colocando 30 recipientes sobre esta cuadrícula bajo el simulador de lluvia. Se realiza una simulación de lluvia de 15 minutos y se registra el volumen de agua recogido en cada uno de los recipientes. El mismo procedimiento se repite 6 veces para identificar la existencia de alguna variabilidad espacial y temporal en los resultados. Como datos tras una calibración realizada la boquilla produce una intensidad reproducible tanto espacial como temporalmente de 70,03 mm h⁻¹ (n=6) en 12 de los 30 puntos de calibración. La distribución del tamaño de gotas y la KE de la lluvia se determina empleando el método Cumulative Drop Class (CDCM) (Simmons, 1998). Éste método se basa en el cálculo de la KE de la lluvia (J m⁻²) mediante la suma de las energías cinéticas de cada clase individual de tamaño de gota. El tamaño de la gota se determina mediante una modificación del método de Hudson (1964), siguiendo la metodología propuesta por Simmons (1998). El valor medio de D₅₀ calculado es de 1,33 mm. La boquilla produce una KE reproducible espacial y temporalmente de 10,88 J m⁻² min⁻¹ (estimada mediante CSCM). Una vez calibrado

el simulador, se pesan 50 g de muestra de agregados del tamaño 3,35-5 mm y se humedecen con 100 mL de agua destilada durante 30 minutos, para asegurar las mismas condiciones iniciales que en el método de tamizado en húmedo (B.1.4). A continuación, estas muestras se transfieren a la parte central del los tamices de 0,5 mm de malla, para evitar los efectos de borde durante la simulación. Aquí se emplea un solo tamiz en lugar de la batería de tamices usada en el método de tamizado en húmedo, para evitar que los tamices superiores intercepten y modifiquen la lluvia que llega a los inferiores. Finalmente, las muestras se someten a la simulación de lluvia durante un tiempo igual al empleado en la agitación del tamizado en húmedo (17 minutos). Doce tamices con los agregados se sitúan en los puntos de calibración bajo el simulador de lluvia, 2 m por debajo de la boquilla. El mismo procedimiento se repite 6 veces para cada muestra.

Tras su exposición a la simulación de lluvia, el material que permanece sobre el tamiz se transfiere a un recipiente, se seca en estufa a 105 °C durante 48 h hasta masa constante y se pesa (m_1). Posteriormente el material se dispersa mediante humectación y presión, se lava con agua destilada a través de un tamiz de 0,5 mm de malla y se seca de nuevo en estufa a 105 °C durante 48 h. Finalmente se pesa para determinar la presencia de partículas gruesas (m_2). Este valor se resta de m_1 para obtener los agregados estables al agua mayores de 0,5 mm de diámetro.

Métodos basados en la dispersión de las arcillas

Dentro de este grupo el método más aceptado a nivel mundial es el test de coherencia al agua de Emerson (1967). Este test clasifica los agregados del suelo en ocho clases de estabilidad, basándose en el fraccionamiento, hinchamiento o dispersión de los agregados del suelo cuando se introducen en agua. La principal ventaja de este método es que diferencia los dos procesos básicos de la destrucción de los agregados por el agua (el fraccionamiento y la dispersión), y además permite evaluar indirectamente el efecto dispersante debido al trabajo realizado sobre el suelo. Su principal desventaja es que divide los suelos en clases muy amplias, ya que dentro de cada clase pueden presentarse diferencias amplias en la estabilidad (Greenland et al., 1975) y al tratarse de un test cualitativo es mucho más subjetivo que los métodos cuantitativos anteriormente descritos.

Test de coherencia al agua (Emerson, 1967)

El procedimiento fue descrito por Emerson (1967) y aparece esquematizado en la figura 6. Se seleccionan al azar 6 agregados de diámetro entre 3-5 mm de cada muestra de suelo secada al aire, y se dejan caer en 200 mL de agua destilada, en vasos de 250 mL.

Los suelos cuyos agregados se destruyen y dispersan al introducirlos en agua se incluyen en las clases de 1 a 6, y aquellos agregados que permanecen intactos se sitúan en las clases 7 u 8. Si después de 5 minutos los agregados que permanecen intactos, muestran un hinchamiento visible, el suelo es de clase 7. Si no se observa ni hinchamiento ni destrucción es de la clase 8. Si después de 5 minutos se observa dispersión completa de la arcilla, el suelo se sitúa en la clase 1. Cuando la dispersión es incompleta, el suelo se sitúa en la clase 2. Las muestras en las que los agregados se destruyen pero no se dispersan se someten a una tensión de 0,1 bar durante 72 horas. La muestra húmeda se moldea formando cubos de 3-5 mm y se introducen en agua

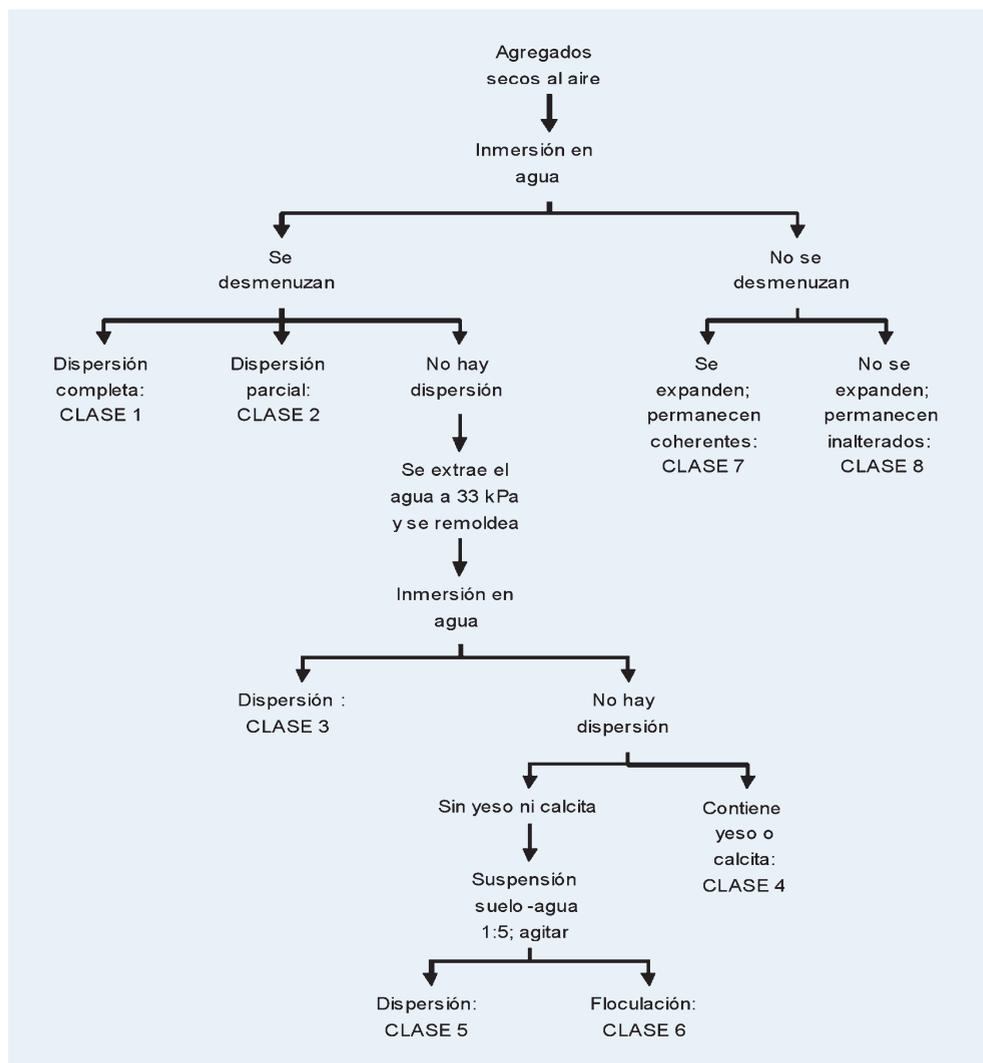


Figura 6. Representación esquemática del test de Emerson (1967).

destilada. Si después de 16 horas se detecta dispersión de arcilla, el suelo se sitúa en la clase 3. Si no se detecta dispersión, se prepara una suspensión 1:5 del suelo moldeado en agua destilada, se agita 10 minutos y se deja reposar 5 minutos. Cuando se produce la dispersión después de este tratamiento más vigoroso, el suelo entra en la clase 5. Si permanece floculado y no presenta carbonato cálcico o yeso se sitúa en la clase 6. Cuando estos suelos presentan carbonato cálcico o yeso entran en la clase 4.

Algunos autores han desarrollado test de Emerson más sencillo para poder ser aplicados a un mayor número de muestras (Cerdà, 2000).

En el caso de suelos yesosos las muestras se deben secar a una temperatura menor o igual a 50 °C para eliminar la humedad de la muestra pero no el agua de constitución del yeso. Además, el agua usada deberá estar saturada en yeso para evitar problema de disolución, de manera que, por cada litro de agua destilada, disolveremos 2,6 g de sulfato cálcico dihidratado, ya que la solubilidad es de ese orden a 25 °C.

Métodos de estabilidad de agregados que emplean ultrasonidos

Los métodos de dispersión por ultrasonidos consisten básicamente en sumergir los agregados en agua y aplicarles una dosis de energía controlada por medio de una fuente de ultrasonidos, cuantificando los agregados que resisten al tratamiento.

Como en cualquier evaluación de la estabilidad estructural, la obtención de las muestras y su transporte al laboratorio deben realizarse cuidadosamente para evitar cualquier alteración de los agregados, especialmente aquéllos poco estables. La muestra se somete a un tamizado suave para seleccionar las fracciones diamétricas de agregados a analizar. Es importante insistir en evitar que los agregados originales se rompan. Las clases diamétricas de agregados a analizar, la energía a aplicar, así como la discriminación de los agregados resistentes, pueden variar en función de los objetivos y las condiciones particulares de cada experimento. Como fuente de ultrasonidos se puede utilizar un desintegrador o un baño de ultrasonidos. A continuación se describen protocolos adaptados a una u otra fuente de ultrasonidos.

Método con desintegrador por ultrasonidos (Edwards y Bremner, 1967)

El método de dispersión por ultrasonidos está basado en los descritos y discutidos por, entre otros autores, Edwards y Bremner (1967), North (1976), Imeson y Vis (1984) y Cerdà (1993; 1996; 1998). La fuente de energía es un desintegrador por ultrasonidos (por ejemplo Sonifier 1312 cell disruptor, BransoSonic Power Company, Danbury, Connecticut; Figura 7). A continuación se describen protocolos que ilustran la diversidad de opciones que ofrece este método.

Se seleccionan agregados entre 2 y 0,2 mm de diámetro. Para cada muestra, se pesa con exactitud 5 g (2 - 0,2 mm) y se traspasa a un frasco de polipropileno de 120 mL de capacidad (78 mm de altura, 53 mm de diámetro). Se añade 60 mL de agua destilada con suavidad, dejándola resbalar por las paredes del recipiente. La energía se aplica mediante un desintegrador por ultrasonidos Branson Sonifier 250. Para ello se sumerge la punta de la sonda 10 mm, y se suministra una energía de 10 W (Output control 1, Loading meter 40) durante 10 segundos. Seguidamente se traspasa suavemente toda la muestra a un tamiz de 0,2 mm, enjuagando el recipiente haciendo resbalar el agua por las paredes. Se sumerge ligeramente el tamiz en una bañerita con agua, oscilando el tamiz lentamente para eliminar la fracción <0,2 mm sin alterar el resto de la muestra. La fracción <0,2 mm puede rechazarse. Con la ayuda de una varilla y chorros de agua (frasco lavador con punta fina), se disgrega la fracción de suelo que quedó en el tamiz, guardando por separado la fracción <0,2 mm que atraviesa el tamiz respecto a las partículas >0,2 mm que no lo atraviesan (por ejemplo, usando frascos de orina u otros recipientes de acorde con el diámetro del tamiz y el volumen de agua utilizado). Para esta acción podemos ayudarnos de un embudo pequeño. De esta forma separamos los agregados que se mantuvieron >0,2 mm tras

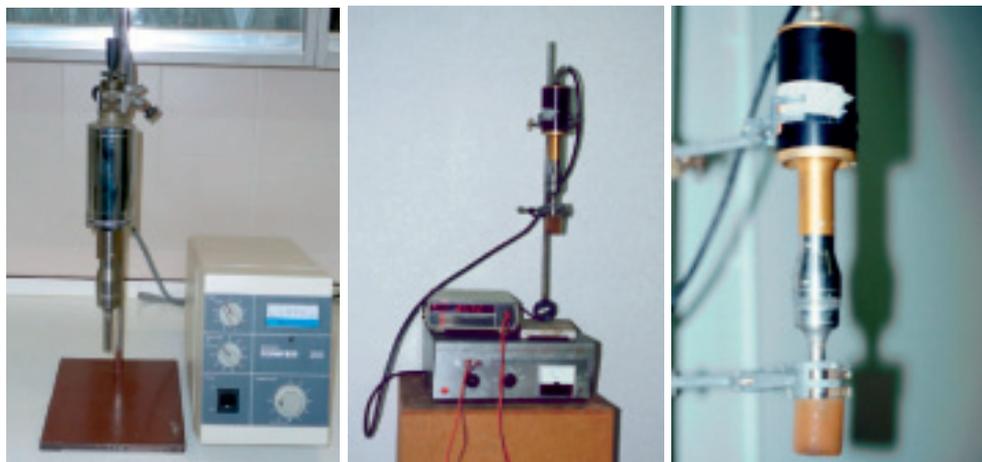


Figura 7. A la izquierda desintegrador por ultrasonidos. Fotografía Joan Llovet López. En el centro y la derecha el Sonifier 1312 cell disruptor, BransoSonic Power Company, Danbury, Connecticut, utilizado en la Universidad de Amsterdam. Fotografía Artemi Cerdà.

el tratamiento con ultrasonidos (y que atravesaron el tamiz tras la disgregación con la varilla), de las partículas de suelo $>0,2$ mm (que quedaron remanentes en el tamiz). Ambas fracciones se secan en la estufa y se pesan.

El resultado se expresa como el porcentaje de agregados estables tras el tratamiento con ultrasonidos, con respecto al total de agregados presentes en la muestra inicial, utilizando la fórmula siguiente:

$$\% AE = \frac{A}{B - C} \times 100 \quad [6]$$

donde: A: peso seco de los agregados remanentes en el tamiz tras el tratamiento con ultrasonidos, y que lo atravesaron después de la desagregación con la varilla y el chorro de agua; B: peso seco inicial de la muestra; y C: peso seco de las partículas de suelo que quedaron remanentes en el tamiz, tras la desagregación con la varilla y el chorro de agua

Una de las cualidades del método de dispersión por ultrasonidos es que permite aplicar distintos tiempos y distintas intensidades. Un ejemplo de protocolo utilizado para este tipo de estudios es el siguiente: se seleccionan 10 agregados de 4-4,8 mm de diámetro que se colocan en 40 mL de agua destilada, sobre la que se aplica durante el tiempo estipulado (entre 5 y 10 minutos, pero se puede modificar) los ultrasonidos mediante una sonda colocada 1 cm por debajo del nivel del agua del recipiente en el que se han colocado los agregados (el recipiente debe tener al menos 4 cm de profundidad total de agua). El nivel de energía oscila entre 35 y 115 vatios. Después de la aplicación de este tratamiento, se pasan los 40 mL de agua destilada con los agregados por un tamiz de 2,8 mm de luz. Se separan las dos fracciones ($< 2,8$ mm y $> 2,8$ mm) y se secan. También se puede agilizar la toma de datos cuantificando el número de agregados supervivientes (aquéllos que no pasen por la luz del tamiz de 2,8 mm), pero es más exacta la medición de la muestra que persiste en agregados mayores de 2,8 mm.

Método con baño de ultrasonidos (Holz et al., 2000)

Este método está basado en el descrito por Holz et al. (2000). Se utilizan muestras de suelo, secadas al aire y tamizadas por malla de 2 mm. Se pesan 8 gramos de muestra (A) mediante una balanza analítica y posteriormente se esparcen sobre un tamiz de luz de malla de 0,2 mm. A continuación se añaden en el baño de ultrasonidos 200 mL de agua destilada. Se introduce el tamiz con la muestra en el interior del baño de ultrasonidos, quedando éste sumergido junto con la muestra. Se aplica una energía de 40 KHz durante 8 minutos. Acabado este tiempo se extrae el tamiz y se procede a limpiarlo para recoger los macroagregados estables y las arenas gruesas que han quedado en él. Se pasa a una cápsula que posteriormente se decantará y se introducirá en la estufa a 105 °C para desecar la muestra. Transcurridas 24 horas se extraen las cápsulas de la estufa y se introducen en un desecador donde deberán estar alrededor de unas 2 horas hasta que la muestra alcance la temperatura ambiente. Se pesa la muestra en una balanza analítica y de esta forma se obtiene el peso de los macroagregados estables y las arenas gruesas (B). Posteriormente se determinan las arenas gruesas presentes en B, vertiendo de la muestra mediante lavado. Se introduce esta muestra, sometida a los ultrasonidos y secada en la estufa, en un tamiz con luz de malla de 0,2 mm y se lava hasta que sobre el tamiz quedan las arenas de tamaño superior a 0,2 mm. Se lava el tamiz y se recogen las arenas gruesas en una cápsula y se desecan en una estufa a 105 °C. Transcurridas 24 horas se extraen las cápsulas y se introducen en un desecador hasta que alcance la temperatura ambiente. A continuación se pesan en una balanza analítica obteniendo de esta forma la cantidad de arenas gruesas que contiene la muestra C).

Para el cálculo de la estabilidad de los agregados se aplica la siguiente expresión:

$$\% AE = \frac{B - C}{A - C} \times 100 \quad [7]$$

donde: A: peso de la muestra de suelo < 2 mm; B: peso de macroagregados estables más arenas gruesas; y C: peso de arenas gruesas.

EFECTO DEL FUEGO EN LA ESTABILIDAD DE AGREGADOS. ALGUNOS EJEMPLOS DE PATRONES DE AGREGACIÓN EN SUELOS QUEMADOS

El efecto del fuego en la agregación del suelo ha sido estudiado por diferentes investigadores, tanto en suelos afectados por incendios forestales (Andreu et al., 2001; Mataix-Solera et al., 2002; Mataix-Solera y Doerr, 2004; Varela, 2007; Arcenegui et al., 2008; Llovet et al., 2009), como en quemas experimentales (Mataix-Solera, 1999; Campo et al., 2008a y b), o utilizando muestras de suelos y realizando quemas controladas en laboratorio (Guerrero et al., 2001; Llovet et al., 2008b).

Los resultados, en muchos casos aparentemente contradictorios, requieren el análisis particular de numerosos factores implicados para poder llevar a cabo una adecuada interpretación. En la mayor parte de los casos estudiados se observa que el fuego produce una fragmentación de agregados y pérdida de estabilidad, aunque en algunos casos no se han observado diferencias y en otros los resultados han mostrado una agregación mayor en los suelos quemados.

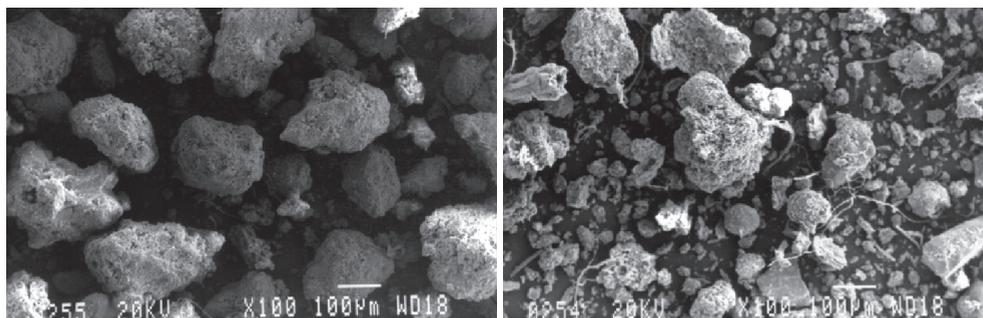


Figura 8. Ejemplo de uno de los patrones de agregación tras el paso del fuego. Desagregación en este caso producto de una elevada combustión de la materia orgánica. A la izquierda muestra de suelo control (no quemado) y la derecha muestra de suelo quemado (fotografías realizadas por microscopía electrónica; Mataix-Solera et al., 2002).

Dependiendo de la severidad de fuego y la naturaleza de los suelos, los cambios serán más o menos evidentes e irán en un sentido u otro. Cuando se observa una pérdida de agregación, ésta suele ser atribuida a la degradación de la materia orgánica como consecuencia de su combustión, si el fuego ha sido de elevada severidad. Pero no siempre los incendios son tan severos y también hay que tener en cuenta que hay suelos en los que otros agentes cementantes –además de la materia orgánica- tienen un peso importante en la resistencia física de los agregados a la ruptura. En otras ocasiones el comportamiento del fuego no conduce a cambios importantes en las propiedades del suelo y no detectándose pérdida de estabilidad de los agregados, por ejemplo, una zona en la que la propagación del fuego sea a través de las copas de la vegetación arbórea. En éste caso no habrá cambios directos relevantes producidos por el fuego en el suelo. Por otro lado, hay casos en los que los cambios producidos por el calor pueden conducir a una estabilidad de agregados mayor, por ejemplo si las temperaturas son suficientes como para producir fusiones térmicas de partículas y recristalizaciones de minerales de la fracción arcilla (Giovanini y Lucchesi, 1997) que conllevan a formar unos agregados más resistentes a la ruptura. La condensación de sustancias hidrofóbicas sobre los agregados también se ha propuesto en algunos casos como una de las causas del aumento de esta estabilidad (Mataix-Solera y Doerr, 2004; Varela, 2007; Arcenegui et al., 2008).

Mataix-Solera et al. (2002), estudiando varias zonas afectadas con distinta severidad por un incendio forestal ocurrido en Alcoi (Alicante) en 1994 observaron que en la zona afectada con mayor severidad se había producido una fragmentación de macro- en microagregados, evidenciada por observaciones de la fracción < 0,250 mm por microscopía electrónica de barrido (Figura 8), además de por la distribución de tamaños de agregados por tamización en seco. En este caso, la elevada severidad del fuego produjo una disminución del contenido de materia orgánica del suelo y como consecuencia una destrucción de agregados. Sin embargo, la comparación de la estabilidad de macroagregados utilizando el test de simulación de lluvia 2 descrito anteriormente no mostró diferencias estadísticamente significativas entre suelos quemados y controles.

Varela (2007) a través del estudio de 28 zonas quemadas de Galicia y sus respectivos controles (no quemados) concluyeron de manera similar, que el fuego favorece en la mayor parte

de las zonas la fragmentación de los macroagregados en microagregados, observándose como consecuencia una disminución del diámetro medio ponderado (DMPs; Figura 9). Partían de suelos no quemados caracterizados por presentar agregados de pequeño tamaño, sin prácticamente agregados mayores de 5 mm, predominando, en general, las fracciones entre 1 y 0,05 mm, condicionado por su granulometría (con una baja proporción de arcilla) y un pH ácido. Sin embargo, presentaban una elevada estabilidad de los agregados al agua, debido fundamentalmente a los altos contenidos en materia orgánica. La elevada repelencia al agua es considerada por estos autores como otro factor que contribuye a aumentar la estabilidad de los agregados en estos

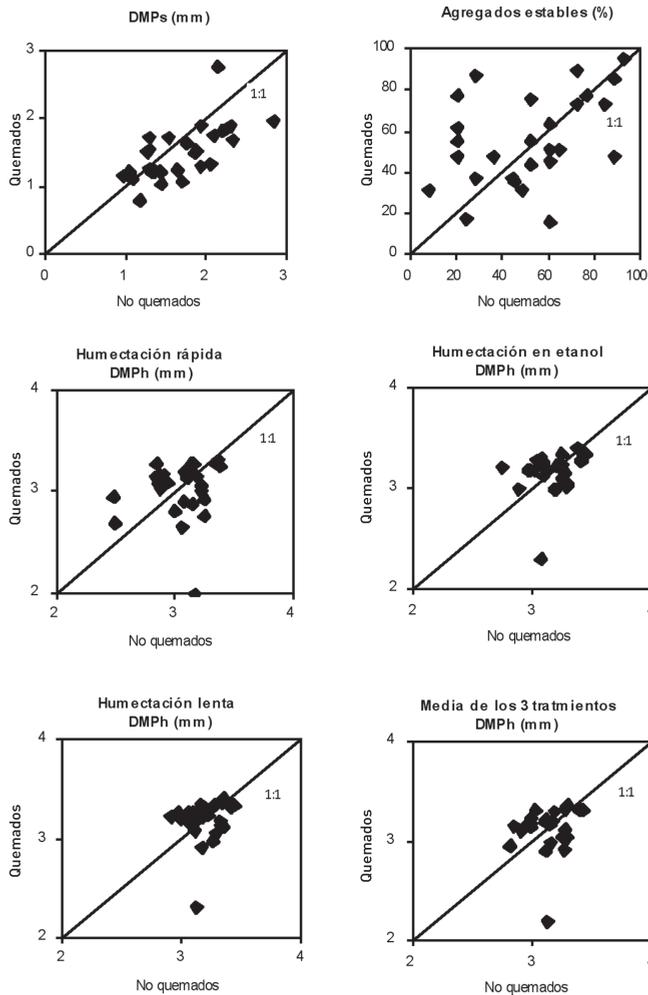


Figura 9. Diferencias entre los suelos quemados y no quemados en la distribución de agregados por tamización en seco (DMPs) y en la estabilidad de agregados al agua mediante el test CND (% de agregados estables) y el test de Le Bissonnais (DMPH) para cada tratamiento y media de los tres. Cada punto corresponde al valor del quemado frente al no quemado para cada zona de estudio (Varela, 2007).

suelos de Galicia. El efecto del fuego en la estabilidad de los agregados al agua fue mucho más variable, incrementándose tras el fuego en aproximadamente un 40% de los suelos, disminuyendo en otro 40% y en el resto no se apreciaron cambios. Estas variaciones se relacionaron con los cambios observados en la materia orgánica durante el incendio. En este caso los tests empleados para el estudio de la estabilidad de agregados fueron el del impacto de la gota de agua (CND; Low, 1954) y el test de tamización en húmedo 3 de Le Bissonnais y Gaillard (1997) modificado por Taboada (2001).

La comparación de los resultados obtenidos entre los dos métodos de estabilidad al agua utilizados les permitió señalar que ambos eran precisos y fácilmente reproducibles, aunque estos autores destacan que el test de Le Bissonnais es, a diferencia del método CND, muy laborioso y requiere mucho tiempo. Además resultó menos discriminante a la hora de analizar las variaciones en la estabilidad de los agregados de los suelos naturales y de los cambios ocasionados por el fuego. Sin embargo, este test presenta la ventaja de que permite apreciar diferencias entre los distintos mecanismos de desagregación del suelo, por lo que podría ser aplicable en otros ambientes y tipos de suelos.

Andreu et al. (2001) en un estudio comparativo sobre suelos de pinar incendiados en la provincia de Valencia, en cuanto a la estabilidad de los macro y microagregados y al efecto en estos de la orientación orográfica, observaron que, en cualquier caso, el efecto del paso del fuego en condiciones de alta severidad afectó principalmente a los 5 cm superficiales del suelo y, sobre todo, a los agregados de diámetro mayor a 2 mm. El efecto degradativo de las altas temperaturas en la agregación se reflejó también en una disminución clara de los agregados antes citados y en un aumento de los microagregados, particularmente la fracción menor a 1 mm. Estas circunstancias se dieron de una forma más acentuada en las zonas con orientación sur, siendo acompañadas de un incremento en los niveles de CaCO_3 y de N amoniacal. Estos autores encontraron que la evolución estacional de los agregados mostró cambios más netos en macroagregados que en microagregados. Después del fuego, observaron un aumento en la agregación en invierno y principios de primavera, para disminuir en verano y con las lluvias de otoño características del clima mediterráneo. La fracción de agregados con diámetro de 16-32 μm fue la que mejor mostró variaciones, con una recuperación a finales del invierno en el suelo con orientación norte, pero sin una mejora clara de la microestructura en los suelos orientados hacia el sur. En estos últimos, la proporción cada vez mayor de microagregados menores a 16 μm reflejó una degradación progresiva.

Estos mismos autores realizando estudios mediante el uso de quemas experimentales en parcelas cerradas, analizaron el efecto de fuegos de distintas intensidades (media y alta) en la estabilidad de los agregados (EA) del suelo (Campo et al., 2008a). Por otro lado, se estudiaron tanto el efecto de la cobertura vegetal como la incidencia del fuego en distintos agentes cementantes (Campo et al., 2008b) de los agregados (materia orgánica y CaCO_3).

Sus resultados mostraron que antes de las quemas los suelos con cobertura vegetal presentaban niveles mayores de materia orgánica (MO), asociados con una mayor estabilidad y un mayor diámetro medio de agregados ($\phi > 0,5 \text{ mm}$), que los suelos desnudos. No obstante, estos últimos presentaban un mayor contenido en CaCO_3 . Inmediatamente después del fuego se apreciaron pocos cambios en estas características en todos los casos, pero estos se hicieron patentes durante el primer mes después del fuego. Así, el contenido en MO y la EA aumentaron. Du-

¿CÓMO ESTUDIAR LA ESTABILIDAD DE AGREGADOS EN SUELOS AFECTADOS POR INCENDIOS?
MÉTODOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

rante el mes siguiente al fuego los suelos quemados con alta intensidad y con cobertura presentaron los mayores valores de EA, mientras que los suelos quemados sin cobertura presentaron muy escasos cambios tanto en la estabilidad como en el diámetro medio de los macroagregados. Esto pudo deberse a procesos de reagregación y endurecimiento de los agregados a temperaturas mayores a 220°C. En los tratamientos de moderada intensidad de fuego los suelos, en todos los casos, no presentaron diferencias significativas. A medio plazo, la EA de todos los suelos quemados aumentó, particularmente en aquellos que presentaban cobertura. Por el contrario, el contenido en MO disminuyó, posiblemente debido a la menor actividad biológica, la lenta recuperación de la vegetación y la incidencia de la erosión.

La alta susceptibilidad del suelo a la erosión durante los primeros meses después del fuego se tradujo en una disminución de la EA, del porcentaje total de los macroagregados de 1-2 mm y del contenido de MO en todos los suelos estudiados. Los suelos bajo planta que sufrieron una alta intensidad fueron los que mostraron una mayor alteración. La relación entre los agentes agregantes y la EA indicaron que el contenido en MO estaba relacionado principalmente con la mayor presencia de agregados con $\varnothing > 0,5$ mm y con la EA en los suelos no quemados. En los quemados, la MO fue el factor más importante en la estabilidad de los agregados de $\varnothing > 1$ mm. Aunque el CaCO_3 podría participar junto con la MO, en la estabilización de los agregados de $\varnothing < 0,5$ mm en todos los suelos estudiados. Los suelos quemados con alta intensidad fueron los más degradados, con un aumento sensible en el porcentaje total de agregados de $\varnothing 0,1-0,05$ mm. Un año después de las quemas todos los suelos afectados presentaron tendencias a la disminución en EA, MO y el diámetro medio de agregados, y al aumento en CaCO_3 . La degradación más importante se observó en los suelos quemados con alta intensidad.

En trabajos referentes al efecto del fuego en los suelos del Valle Medio del Ebro, Badía y Martí (2003), observaron que a temperaturas de 250°C (incendios controlados) la estabilidad de los agregados de suelos yesosos (Gypsisoles hipergípsicos) y de suelos calizos (Regosoles calcáricos), medida mediante el método de tamizado en húmedo B.1.1 disminuyó moderadamente respecto a las muestras control. Sin embargo, esta reducción fue mucho más drástica cuando se alcanzaron los 500°C, donde la materia orgánica se había consumido en su práctica totalidad y el nivel de arcilla del suelo se redujo significativamente respecto a las muestras no quemadas (Tablas 4 y 5).

Tabla 4. Variaciones inducidas por el calor (25, 150, 250 y 500 °C) en la estabilidad de agregados (EA) y la materia orgánica (MO) de suelos yesosos (n=4). Letras distintas entre tratamientos indican diferencias estadísticamente significativas (P<0,01).

	Tratamiento térmico			
	25°C	150°C	250°C	500°C
EA (%)	74,9 a	72,2 a	48,4 b	0,81 c
MO (g kg ⁻¹)	27 a	28 a	22 b	3 c

Tabla 5. Variaciones inducidas por el calor (25, 150, 250 y 500°C) en la estabilidad estructural (EA), la materia orgánica (MO) y el contenido de arcilla de suelos calizos(n=4). Letras distintas entre tratamientos indican diferencias estadísticamente significativas (P<0,01).

	Tratamiento térmico			
	25°C	150°C	250°C	500°C
EA (%)	86,0 a	83,2 a	64,6 b	0,88 c
MO (g kg ⁻¹)	42 a	42 a	32 c	4 d
Arcilla (g kg ⁻¹)	316	270	173	97

Estos autores demostraron la importancia de la materia orgánica en la estabilidad estructural de los suelos en sus zonas de estudio. Evidenciaron la relación positiva y significativa, con ajuste lineal y especialmente con ajuste logarítmico entre la estabilidad de los agregados y la materia orgánica y, en menor grado, entre la estabilidad y la arcilla (Badía y Martí, 1999; Martí et al., 2001). Así, para los suelos del Pirineo Central, obtuvieron el siguiente modelo de edafo-transferencia:

$$\begin{aligned} \text{EA (\%)} &= 41,871 + 54,94 \ln (\% \text{MO}) & [8] \\ r &= 0,74; P < 0,01; n = 125 \text{ (Badía y Martí, 1999)} \end{aligned}$$

Y para varios suelos del Alto Aragón, de ambientes más secos:

$$\begin{aligned} \text{EA (\%)} &= 44,956 + 41,009 \ln (\% \text{MO}) & [9] \\ r &= 0,52; P < 0,01; n = 72 \text{ (Martí et al., 2001)} \end{aligned}$$

Estos resultados evidencian el efecto de la materia orgánica como agente estabilizador de la estructura e indica la importancia de este componente edáfico en la formación de macroagregados. El tipo de ajuste logarítmico pone de manifiesto que cuando en el suelo existe una escasa proporción de materia orgánica, pequeños incrementos de ésta aumentan sensiblemente la agregación de las partículas del suelo.

Llovet (2005) utilizó el test de simulación de lluvia 2 en un experimento para evaluar el estado de la superficie del suelo (0-1 cm) tras un incendio forestal en la localidad de Sotorroni (Sierra de Mariola, N Alicante), analizando el posible efecto del sustrato edáfico y la orientación. Observó una estabilidad de los agregados significativamente superior en suelos sobre dolomías que sobre margas, y significativamente mayor en umbrías que en solanas, sin interacción entre ambos factores. Asimismo, comprobó que la estabilidad de los agregados no estuvo relacionada con la capacidad de infiltración del suelo justo después del incendio, pero sí tras las lluvias posteriores al fuego.

En otro experimento, y empleando el mismo método, Llovet et al. (2009) evaluaron el efecto combinado de la edad de abandono de antiguos cultivos y el fuego en la sierra de La Xortà (N Alicante), también sobre la superficie del suelo (0-1 cm). Los dos factores estudiados, edad de abandono del cultivo y fuego, ayudaron a explicar la varianza encontrada en la estabilidad estructural. Así, el porcentaje de agregados estables fue significativamente menor en las terrazas agrícolas recientemente abandonadas que en las dejadas de cultivar hace décadas, mientras que el fuego provocó un incremento significativo de la estabilidad estructural independientemente de la edad de abandono. Contrariamente, siguiendo este método en agregados entre 4 mm y 1 mm, quemando muestras de suelo bajo condiciones de laboratorio, estos autores no encontraron cambios significativos en la estabilidad de los agregados debidos a la intensidad del fuego (Llovet et al., 2008a).

El método de estabilidad de agregados mediante el uso de ultrasonidos ha sido también empleado por algunos investigadores. Llovet et al. (2008b) lo utilizó para evaluar a medio-largo plazo las aplicaciones de una amplia gama de dosis y tipos de lodos de depuradora en experiencias de repoblación forestal en ambiente mediterráneo seco. El muestreo de campo se desarrolló aprovechando parcelas experimentales establecidas en el interior de la provincia de Valen-

cia, en las que se aplicó lodos de depuradora en hoyos de plantación. Respecto a los resultados de estabilidad de los agregados, cabe destacar que los efectos de la incorporación de lodos fueron significativos a medio-largo plazo de su aplicación (10 años), y no a corto plazo, lo que indicaría una mejora en las condiciones del suelo no perceptibles justo después del tratamiento pero evidentes más tarde.

Los test de impactos de gota CND y TDI han sido también ampliamente utilizados por investigadores. Cerdà (1993) estudiando la estabilidad de agregados en suelos quemados en un incendio ocurrido en Pedralba (provincia de Valencia) en 1990, comprobó que el fuego dio lugar a cierto debilitamiento de la estructura del suelo con valores que pasaron de 165 a 98 en la muestra seca; y de 176 a 110 en la muestra húmeda a pF1 para el parámetro NDI50 (Tabla 6). En el caso de la media de número de impactos, el fuego produjo un descenso de 150 a 112 y de 160 a 123 impactos de gota para los suelos secos y a pF1. Estos datos se suelen mostrar en forma de curva de distribución como en la figura 10, por lo que deben ser ordenados de mayor a menor número de impactos.

Tabla 6. Test CND aplicado a las muestras del incendio de Pedralba (Cerdà, 1993).

Muestra Agregado	Humedad %	Seco Control Gotas	Seco Quemado Gotas	pF1 Control Gotas	pF1 Quemado Gotas
1	5	200	200	200	200
2	10	200	200	200	200
3	15	200	185	200	200
4	20	200	166	200	175
5	25	198	149	200	170
6	30	186	126	200	154
7	35	188	120	200	142
8	40	178	115	195	132
9	45	174	102	185	120
10	50	165	98	176	110
11	55	149	96	164	102
12	60	142	94	159	98
13	65	132	92	142	97
14	70	125	85	132	95
15	75	108	79	120	85
16	80	98	75	112	82
17	85	96	71	110	77
18	90	89	70	109	76
19	95	85	65	100	69
20	100	83	60	98	68
Media		145	112	160	123

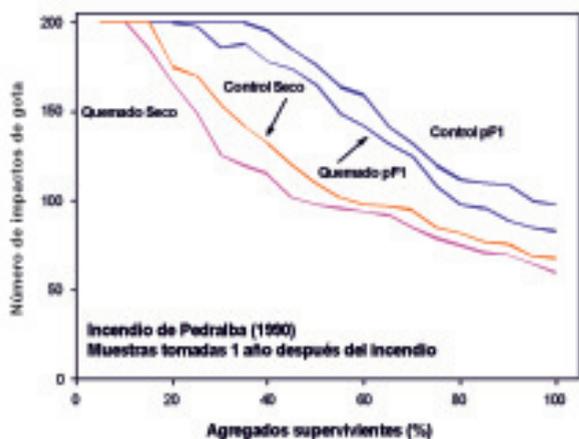


Figura 10. Test CND (*Counting the Number of Drop-impacts*) aplicado a las muestras del incendio de Pedralba (Cerdà, 1993). Porcentaje de agregados supervivientes al impacto de gota distinguiendo entre los húmedos a pF1 y los secos.

Tabla 7. Test TDI aplicado a las muestras del incendio de Pedralba (Cerdà, 1993). Muestra superviviente a 10 impactos de gota. Cada muestra es la media de la medición de 20 agregados.

Muestra	Control Seco	Quemado Seco	Control pF1	Quemado pF1
	%	%	%	%
1	98	98	98	98
2	96	95	96	95
3	94	92	94	92
4	93	91	93	91
5	91	90	91	90
6	89	89	89	89
7	89	87	89	87
8	87	86	87	86
9	86	85	86	85
10	85	81	85	81
Media	91	90	91	90

Este mismo autor empleó el método TDI a las mismas muestras del incendio de Pedralba. Con el test TDI se aplica muy poca energía, y en el caso de las muestras de Pedralba mostró un ligero incremento de la pérdida de muestra en los agregados procedentes de suelos quemados (Tabla 7), si bien las diferencias fueron del 1%. Valores similares, pero ligeramente más altos se midieron cuando las muestras se humedecieron a pF1 durante 24 horas antes de la aplicación del test. El test TDI podría incrementar la energía aplicada si se aumentase el número de gotas aplicadas, pero en ese caso se considera mejor aplicar el test CND (*Counting the Number of Drop-Impacts*).

Úbeda et al. (1990) también emplearon estos dos test (CND y TDI) en suelos quemados y sus resultados mostraron también una disminución de la estabilidad tras el fuego. En este caso, se trataba de agregados que habían sufrido una quema prescrita cuyo objetivo era la investigación de los efectos del fuego en el suelo. Se observó, tanto en un método como en el otro, una disminución de la estabilidad. Se disgregaron más fácilmente los agregados quemados que los agregados que no habían sufrido el impacto del fuego.

Si bien comprobamos que la mayor parte de los trabajos han encontrado una pérdida de estabilidad estructural debida al fuego, hay

también estudios en los que se han encontrado patrones opuestos. En este sentido Guerrero et al. (2001), realizando quemas controladas en laboratorio de suelos de la provincia de Alicante, encontraron que la estabilidad de agregados (medida con el método de simulación de lluvia 2) aumentaba con la temperatura aplicada. Arcenegui et al. (2008), estudiando la estabilidad de

agregados con el mismo método, pero con muestras de 10 incendios ocurridos en la provincia de Alicante y comparándolas con muestras de suelos no quemados (controles) adyacentes, también observaron que la estabilidad de los agregados era superior en los quemados en muchos de los casos.

Vemos pues, que la respuesta de los agregados al paso del fuego puede ser muy variable y compleja de evaluar, y que por tanto si la medida de la estabilidad de los agregados no va acompañada del análisis de otros parámetros (distribución de tamaños de agregados, contenido en materia orgánica, repelencia al agua, etc.) podría incluso llevarnos a interpretaciones erróneas en determinados casos.

En un principio, la combustión de la materia orgánica en incendios de alta intensidad llevaría a la destrucción de agregados, teniendo en cuenta el importante papel de ésta en la agregación (Oades, 1993). Sin embargo en otros casos, tal y como indicamos, se ha encontrado un patrón opuesto, es decir valores de estabilidad superior en los suelos quemados comparando con los valores de los suelos controles de referencia (Guerrero et al., 2001; Mataix-Solera y Doerr, 2004; Arcenegui et al., 2008). Las diferentes razones que pueden explicar este último efecto podrían ser las siguientes: i) tipo de incendio: en el caso de los incendios de copas, donde el fuego no afecta directamente al suelo, se puede producir un aumento del contenido en materia orgánica edáfica debido a la incorporación de material semipirolizado procedente de la vegetación. Esta hipótesis no puede sin embargo explicar un aumento inmediato, aunque sí a medio y largo plazo; ii) la mineralogía de la fracción arcilla puede modificarse por el calentamiento formando agregados más estables físicamente. Este fenómeno ha sido estudiado por diferentes autores, tanto en experiencias de campo (Giovannini y Lucchesi, 1997), como en experimentos de laboratorio (Guerrero et al., 2001). La fusión de las partículas de arcilla en partículas de mayor tamaño es el resultado de modificaciones mineralógicas debidas a las altas temperaturas alcanzadas en suelos con presencia de óxidos e hidróxidos de hierro y de aluminio, y pueden ser los responsables de la formación de agregados nuevos más resistentes a la ruptura (Giovannini et al., 1990); iii) que el aumento observado sea aparente, es decir, el fuego puede destruir una proporción de los agregados por la combustión de la materia orgánica, y dejar los más resistentes, con lo cual, puede ser que al muestrear estemos haciendo ya una selección de los agregados más resistentes puesto que son los que permanecen después del incendio en el suelo. Este resultado nos indicaría que los agregados del suelo quemado son más estables que los del no quemado, pero no necesariamente está diciendo que se ha producido aumento de la estabilidad, simplemente es que ha habido una destrucción de los débiles permaneciendo los más resistentes; y, iv) por último otra posible explicación es que la presencia de compuestos hidrofóbicos puede aumentar la estabilidad de agregados. Este fenómeno ha sido también documentado por varios autores (Chenu et al., 2000; Hallett et al., 2001; Mataix-Solera y Doerr, 2004; García-Corona et al., 2004; Varela, 2007; Arcenegui et al., 2008).

De lo anterior, podemos asumir que sería por tanto necesario incluir en los estudios sobre agregación del suelo nuevas variables que permitan interpretar correctamente los resultados obtenidos (severidad del fuego, características del suelo, lluvias ocurridas si el muestreo no es inmediato al paso del fuego, etc.).

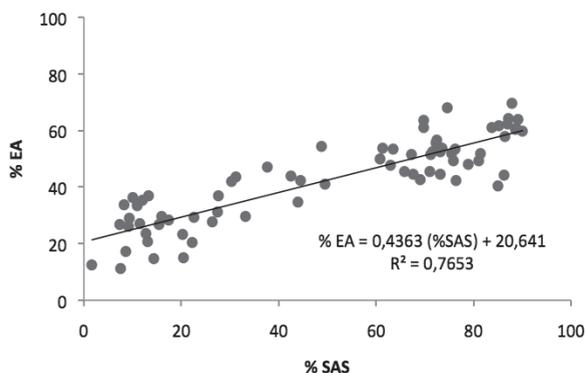


Figura 11. Relación entre los valores porcentuales de la estabilidad estructural obtenidos con el método de tamizado en húmedo 1 (SAS) y de lluvia simulada 2 (EA). Martí et al. (2001).

Respecto al método a emplear, es también complicado decidir cuál, puesto que los resultados son siempre relativos a la energía aplicada y como hemos comentado los resultados obtenidos por varios métodos no serán comparables. En este sentido algunos autores han realizado comparaciones entre métodos. Martí et al. (2001) comparando entre el método de tamizado en húmedo 1 y el de simulación de lluvia 2 comprueban que, aunque los valores de estabilidad de agregados son lógicamente diferentes existe una correlación altamente significativa entre

ambos, reflejando una proporcionalidad entre los resultados (Figura 11).

Varela (2007) empleó varios métodos, encontrando una alta correlación entre el test CND y el test de tamizado en húmedo 3 de Le Bissonnais. Sin embargo el CND mostró mayor correlación con el tratamiento de humectación rápida que con los tratamientos de humectación con etanol y de humectación lenta con agua. En cuanto a los tres diferentes tratamientos de que consta el test de Le Bissonnais, aunque todos ellos mostraron la misma tendencia, el tratamiento de humectación rápida fue el que permitió diferenciar más adecuadamente las variaciones de estabilidad observadas entre los diferentes suelos. En estos suelos de Galicia, el principal problema que se plantea a la hora de aplicar estas metodologías es la dificultad a la hora de prehumedecer los suelos con agua en los test de tamización en húmedo y el test de simulación de lluvia, debido a la fuerte repelencia al agua que generalmente presentan. Es por ello que los métodos que menos problemas plantean son la distribución de los agregados por tamización en seco, y dentro de los test de estabilidad de agregados, el test de tamización de Le Bissonnais y Gaillard (1997) y el test de impacto de la gota de agua (Low, 1954). Destacar, sin embargo, el proceso laborioso de seleccionar, sobre todo en los suelos quemados, los agregados de tamaño 5-3 mm ó 5-4 mm necesarios para la realización de los ensayos.

CONCLUSIONES

La estabilidad de agregados aporta información sobre la estructura del suelo, pero al ser dependiente de la química y la biología del suelo se convierte en un parámetro integrador del complejo sistema suelo. Existen muchos métodos para estudiarla y en éste capítulo se han descrito algunos de los más empleados en los estudios sobre la agregación en suelos quemados. Los resultados son siempre relativos a la energía empleada en cada método, por lo que, resultados de diferentes métodos no serán comparables. Cualquiera de los métodos indicados en este capí-

tulo han sido referenciados en trabajos publicados en revistas internacionales y están por tanto aceptados por la comunidad científica. La elección del método más adecuado a emplear debe realizarse siempre teniendo en cuenta los objetivos concretos de cada estudio, así como el tipo de suelo a estudiar. Los estudios de agregación en suelos quemados muestran que aunque en la mayoría de los casos se produce una desagregación cuando se ha alcanzado una alta severidad, no siempre es éste el patrón observado. Factores tales como las temperaturas alcanzadas, y la composición mineralógica del suelo pueden conducir en algunos casos a tendencias opuestas. Es aconsejable incluir en el estudio de la agregación en suelos quemados además de uno de los test de estabilidad de agregados, la distribución de tamaños de estos (test de tamizado en seco, de Kemper y Rossenau (1986), para una mejor comprensión del efecto que el fuego ha tenido. También es aconsejable la inclusión en el estudio de otras variables relacionadas (contenido de materia orgánica, textura, repelencia al agua, etc.) con el fin de alcanzar una mejor interpretación de los resultados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Ciencia e Innovación la financiación del desarrollo de la Red Temática "Fuegored. Efectos de los incendios forestales sobre los suelos" (CGL2007-28764-E/BTE; CGL2008-01632-E/BTE y CGL2009-06861-E/BTE).

REFERENCIAS

- Amezketeta, E., Singer, M.J. y Le Bissonnais Y. 1996. Testing a new procedure for measuring water-stable aggregation. *Soil Science Society of American Journal*, 60, 888-894.
- Andreu, V., Imeson, A. y Rubio, J.L. 2001. Temporal changes in soil macro and microaggregation induced by forest fires and its incidence on water erosion. *Catena*, 44, 69-84.
- Arcenegui, V., Mataix-Solera, J., Guerrero, C., Zornoza, R., Mataix-Beneyto, J. y García-Orenes, F. 2008. Immediate effects of wildfires on water repellency and aggregate stability in Mediterranean calcareous soils. *Catena*, 74, 219-226.
- Badía, D. y Martí, C. 1999. Suelos del Pirineo Central: Fragen. INIA, UZ, CPNA, IEA. 190 pp. Huesca.
- Badía, D. y Martí, C. 2003. Plant ash and heat intensity effects on chemical and physical properties of two contrasting soils. *Arid Land Research and Management*, 17, 23-41.
- Benito, E. y Díaz-Fierros, F. 1992. Estudio de las sustancias estabilizantes de la agregación en suelos ricos en materia orgánica. I. Composición de los agregados estables. *Agrochimica*, 36, 324-339.
- Benito, E., Gómez, A. y Díaz-Fierros, F. 1986. Descripción de un simulador de lluvia para estudios de erodibilidad del suelo y estabilidad de los agregados al agua. *Anales de Edafología y Agrobiología* 9-10, 1115-1126.
- Bergsma, E. y Valenzuela, C.R. 1981. Drop testing aggregate stability of some soils near Merida, Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 6, 309-318.
- Bryan, R.B. 1968. The development, use and efficiency of indices of soil erodibility. *Geoderma*, 2, 5-26.
- Bryan, R.B. 2000. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology*, 32, 385-415.
- Campo, J., Andreu, V., Gimeno-García, E., González-Pelayo, O. y Rubio, J.L. 2008a. Medium term evolution of soil aggregate stability, organic matter and calcium carbonate of a Mediterranean soil burned

- with different intensities. En: C. Dais and E. Costantini (Eds.), *Advances in GeoEcology* 39. Catena Verlag, Reiskirchen, pp. 330-344.
- Campo, J., Gimeno-García, E., Andreu, V., González, O. y Rubio, J.L. 2008b. Aggregation of under canopy and bare soils in a Mediterranean environment affected by different fire intensities. *Catena*, 74, 212-218.
- Cerdà, A. 1993. Incendios forestales y estabilidad de agregados: Cuadernos de Geografía, 53, 1-16.
- Cerdà, A. 1996. Soil aggregate stability in three Mediterranean environments. *Soil Technology*, 9, 129-133.
- Cerdà, A. 1998. Soil aggregate stability under different Mediterranean vegetation types. *Catena*, 32, 73-86.
- Cerdà, A. 2000. Aggregate stability against water forces under different climates on agriculture land and scrubland in southern Bolivia. *Soil and Tillage Research*, 36, 1- 8. .
- Cerdà, A., Imeson, A.C. y Calvo, A. 1995. Fire and aspect induced differences on the erodibility and hydrology of soils at La Costera, Valencia, Southeast Spain. *Catena*, 289-304. .
- Cerdà, A. y Mataix-Solera, J. 2009. Efectos de los incendios forestales sobre los suelos en España. El estado de la cuestión visto por los científicos españoles. Cátedra de Divulgación de la Ciencia-Fuegored. Valencia, 529 pp.
- Certini, G. 2005. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*, 143, 1-10.
- Chenu, C., Le Bissonnais, Y. y Arrouays, D. 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 1479-1486. .
- Chepil, W.S. 1962. A compact rotary sieve and the importance of dry sieving in physical soil analysis. *Soil Science Society of American Proceedings*, 26, 4-6.
- Edwards, A.P. y Bremner, J.M. 1967. Dispersion of soil particles by sonic vibration: *Journal of Soil Science*, 18, 47-63.
- Emerson, W.W. 1967. A classification of soil aggregates based on their coherence in water. *Australian Journal of Soil Research*, 5, 47-57.
- Epstein, E. y Grant, W.J. 1973. Soil crust formation as affected by raindrop impact. En: A. Hadas (Ed.), *Physical Aspects of Soil, Water and Salts in Ecosystems*. Springer-Verlag. New York, pp. 195-201.
- Farres, P.J. 1980. Some observations on the stability of soil aggregates to raindrop impact. *Catena*, 7, 223-231.
- García-Corona, R., Benito, E., de Blas, E. y Varela, M.E. 2004. Effects of heating on some soil physical properties related to its hydrological behaviour in two north-western Spanish soils. *International Journal of Wildland Fire*, 13, 195-199.
- García-Orenes, F. 1992. Estudio sobre la estabilidad de los agregados en suelos, aspectos químicos y micro-biológicos. Trabajo de Licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad de Murcia.
- García-Orenes, F. 1996. Utilización de lodos de depuradora como enmendantes de suelos degradados. Valoración de los cambios en sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad de Alicante.
- Giovannini, G. y Lucchesi, S. 1997. Modifications induced in soil physico-chemical parameters by experimental fires at different intensities. *Soil Science*, 162, 479-486.
- Giovannini, G., Lucchesi, S. y Giachetti, M. 1990. Beneficial and detrimental effects of heating on soil quality. En: J.C. Goldammer y M.J. Jenkins (Eds), *Fire and Ecosystem Dynamics Mediterranean and Northern Perspectives*. SPB Academic Publishing, The Hague, pp. 95-102.
- Greenland, D.J., Rimmer, D. y Payne, D. 1975. Determination of the structural stability class of english and welsh soils using a water coherence test. *Journal of Soil Science*, 26, 294-303.
- Guerrero, C., Mataix-Solera, J., García-Orenes, F., Gómez, I. y Navarro-Pedreño, J. 2001. Different patterns of aggregate stability in burned and restored soils. *Arid Land Research and Management*, 15, 163-171.
- Gutián Ojea, F. y Méndez, J. 1961. Un nuevo método por aspersión para determinar la estabilidad de los agregados del suelo. *Agrochimica VI*, 1, 30-41.

¿CÓMO ESTUDIAR LA ESTABILIDAD DE AGREGADOS EN SUELOS AFECTADOS POR INCENDIOS?
MÉTODOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

- Hallett, P.D., Ritz, K. y Wheatley, R.E. 2001. Microbial derived water repellency in soil. *International Turfgrass Society Research Journal*, 9, 518-524.
- Harris, R.F., Chesters, G., Allen, O.N. y Attoe O.J. 1964. Mechanisms involved in soil aggregate stabilization by fungi and bacteria. *Soil Science Society of America Proceedings*, 28, 529-532.
- Henin, S, Monnier G. y Combeau, A. 1958. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Annales Agronomique*, 9, 73-92.
- Henin, S. y Feodoroff, A. 1958. Sous-soulage et drainage-taupe. *Annales Agronomique*, 5, 567-591.
- Hillel, D. 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press, San Diego. 771pp.
- Holz, S.C., Ingelmo, F. y Canet, R. 2000. Long term effects of the application of sewage sludge and vegetal cover on some physical and physicochemical properties of a degraded arid soil. *Agrochimica*, 44, 132-139.
- Hoogmoed, W.B. y Stroosnijder, L. 1984. Crust formation on sandy soils in the Sahel. *Soil & Tillage Research*, 4, 5-24.
- Hudson, N.W. 1964. The flour pellet method for measuring the size of raindrops. *Research Bulletin*, No. 4, Department of Conservation and Extension, P.O. Box 8117, Causeway, Salisbury, Rhodesia.
- Imeson, A.C. 1984. An eco-geomorphological approach to the soil degradation and erosion problem. En: R. Fantechi y N.S. Margaris (Eds), *Desertification in Europe*. D. Reidel publishing Co. Dodrecht, 110-125.
- Imeson, A.C. y Vis M. 1984. Assessing soil aggregate stability by water-drop impact and ultrasonic dispersion. *Geoderma*, 34, 185-200.
- Insam, H. y Domsch, K.H. 1988. Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on chronosequences of reclamation sites. *Microbial Ecology* 15: 177-188.
- Jaiyeoba, I.A. y Ologe, K.O. 1990. Soil erodibility measurements in Nigeria. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 34, 307-312.
- Kandeler, E. 1996. Aggregate stability, pp., 390-395. En: F. Schinner, R. Öhlinger, E. Kandeler, y R. Margesin (Eds.), *Methods in soil biology*. Springer-Verlag. Berlín.
- Kemper, W.D. y Koch, E.J. 1966a. Aggregate stability of soils from Western United States and Canada. *United States Department of Agriculture. Technical Bulletin* N° 1355.
- Kemper, W.D. y Koch, E.J. 1966b. Aggregate stability and particule size distribution. In: *Methods of Soils Analysis. Part I. Physical and Mineralogical Methods*. Agronomy Monograph, 9.
- Kemper, M.D. y Rosenau, R.C. 1986. Aggregate stability and size distribution. En: A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1*. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin. Pp.: 425-442.
- Kemper, W.D., Rosenau, R.C. y Nelson, S. 1985. Gas displacement and aggregate stability of soils. *Soil Science Society of America Journal*, 49, 25-28.
- Lax A. y Garcia-Orenes, F. 1993. Carbohydrates of municipal wastes as aggregation factor soil. *Soil Technology*, 6, 157-162 .
- Le Bissonnais, Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 47, 425-437.
- Le Bissonnais, Y. y Gaillard, H. 1997. Mesure de la stabilité structurale des sols. Test sur agrégats. Fiche de protocole. INRA Orléans, Unité de Science du Sol- SESCPF.
- Le Bissonnais, Y. y Le Souder, C. 1995. Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la batance et à l'érosion. *Etude et Gestion des Sols*, 2, 43-55.
- Loch, R.J. y Foley, J.L. 1994. Measurement of aggregate breakdown under rain: comparison with tests of water stability and relationships with field measurements of infiltration. *Australian Journal of Soil Research*, 32, 701-720.
- Low, A.J. 1954. Study of soil structure in field and laboratory. *Journal of Soil Science*, 5, 19-54.
- Low, A.J. 1967. Measurement of stability of moist soil aggregates to falling waterdrops according to Low. In: *West-European Methods for Soil Structure Determination*, Ghent, p. VI-78. .

- Llovet, J. 2005. Degradación del suelo posterior al fuego en condiciones mediterráneas. Identificación de factores de riesgo. Tesis Doctoral, Universidad de Alicante.
- Llovet, J., Josa, R. y Vallejo, V.R. 2008a. Thermal shock and rain effects on soil surface characteristics: a laboratory approach. *Catena*, 74, 227-234.
- Llovet, J., Fuentes, D., Valdecantos, A., Gonçalves do Vale, S.M., Ribeiro da Silva, M.J. y Valiente, Y. 2008b. ¿Perduran en el suelo las enmiendas orgánicas? Análisis en repoblaciones forestales. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 25, 281-286.
- Llovet, J., Ruiz-Valera, M., Josa, R. y Vallejo, V.R. 2009. Soil responses to fire in Mediterranean forest landscapes in relation to the previous stage of land abandonment. *International Journal of Wildland Fire*, 18, 222-232. .
- Martí, C., Badía, D. y Buesa, M.A. 2001. Determinación de la estabilidad estructural de suelos del Altoaragón por tamizado en húmedo y lluvia simulada. *Edafología*, 8, 21-30.
- Martínez-Mena, M., Williams, A.G., Ternan, J.L. y Fitzjohn, C. 1998. Role of antecedent soil water content on aggregates stability in a semi-arid environment. *Soil & Tillage Research*, 48, 71-80.
- Mataix-Solera, J. 1999. Alteraciones físicas, químicas y biológicas en suelos afectados por incendios forestales. Contribución a su conservación y regeneración. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad de Alicante. 330 pp.
- Mataix-Solera, J. y Doerr, S.H. 2004. Hydrophobicity and aggregate stability in calcareous topsoils from fire-affected pine forest in southeastern Spain. *Geoderma*, 118, 77-88.
- Mataix-Solera, J. y Cerdà. 2009. Incendios forestales en España. Ecosistemas terrestres y suelos. En: A. Cerdà y J. Mataix-Solera (Eds), Efectos de los incendios forestales sobre los suelos en España. El estado de la cuestión visto por los científicos españoles. Càtedra de Divulgació de la Ciència. Universitat de València. Valencia. Pp.: 25-53.
- Mataix-Solera, J. y Guerrero, C. 2007. Efectos de los incendios forestales en las propiedades edáficas. En: J. Mataix-Solera (Ed.), Incendios Forestales, Suelos y Erosión Hídrica. Caja Mediterráneo CEMACAM Font Roja-Alcoi. Alicante. Pp.: 5-40.
- Mataix-Solera, J., Gómez, I., Navarro-Pedreño, J., Guerrero, C. y Moral, R. 2002. Soil organic matter and aggregates affected by wildfire in a *Pinus halepensis* forest in Mediterranean environment. *International Journal of Wildland Fire*, 11, 107-114.
- McCalla, T.M. 1944. Water drop method of determining stability of soil structure. *Soil Science*, 58, 117-121.
- Middleton, H.E. 1930. Properties of soils which influence soil erosion. Technical bulletin, Nº 178. U. S. Department of Agriculture. Washington, D.C..
- Murer, E. y Kandeler, E. 1993. Aggregate stability and soil microbial processes in a soil with different cultivation. *Geoderma*, 56, 503-513.
- North, P.F. 1976. Towards an absolute measurement of soil structural stability using ultrasound: *Journal of Soil Science*, 27, 451-459.
- North, P.F. 1979. Assessment of the ultrasonic method of determining soil structural stability in relation to soil management properties. *Journal of Soil Science*, 30, 463-472.
- Oades, J.M. 1984. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant and Soil*, 76, 319-337.
- Oades, J.M. 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma*, 56, 377-400.
- Poesen, J. y Savat, J. 1981. Detachment and transportation of loose sediments by rainfall splash. Part II. *Catena*, 8, 19-41.
- Porta, J., Lopez-Acevedo, M. y Roquero, R. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Mundi-Prensa, Madrid.
- Primo, E. y Carrasco, J.M. 1973. Química Agrícola I: Suelos y fertilizantes. Ed. Alhambra-Longman. Madrid.

¿CÓMO ESTUDIAR LA ESTABILIDAD DE AGREGADOS EN SUELOS AFECTADOS POR INCENDIOS?
MÉTODOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

- Ramos, M.C. y Nacci, S. 1997. Estabilidad estructural de los agregados superficiales en suelos del Anoia-Penedès (Barcelona) frente al humedecimiento y el impacto de las gotas de lluvia. *Edafología*, 3, 3-12.
- Roldán A., García-Orenes, F. y Albaladejo. 1994a. Microbial populations in the rhizosphere of *Brachypodium retusum* and their relationship with stable aggregates in a semiarid soil of southeastern Spain. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 8, 105-114.
- Roldán, A., García-Orenes, F. y Lax, A. 1994b. An incubation experiment to determinate factors involving aggregation changes in an arid soil receiving urban refuse. *Soil Biology & Biochemistry*, 26, 1699-1707.
- Roldán, A., Albaladejo, J. y Thornes, J.B. 1996. Aggregate stability changes in a semiarid soil after treatment with different organic amendments. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 10, 139-148.
- Simmons, R.W. 1998. The effect of polyacrilamide based soil conditioners on structural sealing at a sub-process level. Doctoral dissertation. University of Kent. Canterbury. .
- Singer, A. 1994. Clay mineralogy as affecting dispersivity and crust formation in Aridisols. En: J.D. Etchevers (Ed.), *Transactions of the 15th World Congress of Soil Science*. Acapulco, Mexico. Vol 8a. Int. Soc. Soil Sci. and Mexican Soc. Soil Sci., Acapulco, Mexico. pp. 37-46.
- Taboada, M. 2001. Morfología de superficies cultivadas en relación con la infiltración, la formación del excedente de agua y la erosión. Tesis Doctoral. Universidad de A Coruña. A Coruña.
- Ternan, J.L., Williams, A.G. y González del Tanago, M. 1994. Soil properties and gully erosion in the Guadalupe province, Central Spain. En: R.J. Rickson (Ed.), *Conserving Soil resources: European Perspectives*, pp. 56-69. CAB International, Oxford.
- Úbeda, X., Sala, M. y Imeson, A. 1990. Variaciones en la estabilidad y consistencia de un suelo forestal antes y después de ser sometido a un incendio. I Reunión Nacional de Geomorfología, Teruel: 677-685. .
- Van Bavel, C.H.M. 1952. Compact wet sieving apparatus for soil aggregate analysis. *Agronomy Journal*, 44, 97-98.
- Varela, M.E. 2007. Efectos de los incendios forestales en la degradación física de los suelos de Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Vigo.
- Yoder, R.E. 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *Journal of the American Society of Agronomy*, 28, 337-351.

