



**LA ESTABILIDAD DE LOS AGREGADOS DEL SUELO  
EN AMBIENTES FORESTALES Y ACARCAVADOS  
DEL PIRINEO CENTRAL**

*Aggregate stability of forested soils and badland areas in the Central  
Spanish Pyrenees*

Nadal-Romero, E.(1, 2), Regüés, D.(1), Salvador Sanchís, P. (3) y Torri, D.(3)

(1) Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC), Campus de Aula Dei, Apdo. 13034, 50080, Zaragoza, España

(2) Dep. Earth and Environmental Sciences, Physical and Regional Geography Research Group, K.U. Leuven, Celestijnenlaan 200 E, 3001 Heverlee (Bélgica).

(3) Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica-Unità Staccata di Firenze (CNR). Via Madonna del Piano, 10. 50019 Sesto Fiorentino, Florencia, Italia.

MariaEstela.NadalRomero@ees.kuleuven.be; Telf. 976 71 61 14; Fax 976 71 60 19

**Resumen:** La estabilidad de los agregados determina la erodibilidad del suelo y es un indicador del grado de degradación de los ecosistemas. Este trabajo estudia la estabilidad de los agregados en una pequeña cuenca de montaña, en el Pirineo Central, caracterizada por presentar usos de suelo y cubiertas vegetales muy contrastadas (forestal y cárcavas). Para ello se han determinado las relaciones entre la estabilidad de los agregados y algunas propiedades físico-químicas de los materiales: pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, carbonatos y densidad aparente. La estabilidad de los agregados ha sido determinada en el laboratorio mediante dos técnicas diferentes: el test de la gota (CND) y el método de las rotaciones. La zona forestal presenta mayor estabilidad, mientras el regolito margoso muestra gran fragilidad y susceptibilidad erosiva. También se ha observado una relación directa entre el incremento de la humedad y la estabilidad de los agregados. Asimismo, el contenido de materia orgánica y de carbonatos muestra también un efecto positivo sobre la estabilidad de los agregados. La combinación de los dos métodos de análisis es beneficiosa para el estudio, pues informan sobre distintos componentes de la resistencia (impacto y arrastre). En caso de tener que utilizar uno se aconseja el test de la gota por su sencillez.

**Palabras claves:** estabilidad de agregados, cubiertas de suelo, cárcavas, repoblación forestal, propiedades físico-químicas.



E. Nadal-Romero, D. Regüés, P. Salvador Sanchís & D. Torri (2009). La estabilidad de los agregados del suelo en ambientes forestales y acarcaavados del Pirineo Central. *Rev. C. & G.*, 23 (1-2), 49-64.

**Abstract:** Aggregate stability has been used as an indicator of soil erodibility and ecosystem degradation degree. This paper analyses the aggregate stability in a small catchment, in the Central Spanish Pyrenees, with contrasted land covers (forestry, abandoned fields, meadows and badlands). On this way, the relationships between aggregate stability and some physical and chemical properties of the materials (pH, electrical conductivity, organic matter, carbonates and bulk density) were obtained. The aggregate stability was determined in the laboratory using two different techniques: Drop Test (CND) and Rotations method. The results showed significant differences in agreement with land uses contrasts. Forested area showed higher stability, while loamy regolith presented great fragility and erosive susceptibility. In addition, a direct relationship between moisture raise and aggregate stability has been observed. Also, organic matter and carbonate contents showed a positive effect on aggregate stability. The combination of both methods is favourable for this study, because informed about different components of resistance (splash and transport by overland flow). We suggest the use of the drop-test due to the simple way to apply the test.

**Keywords:** aggregate stability, land covers, badlands, reforestation forestry, physical-chemical properties.

## 1. Introducción

La estabilidad estructural de los agregados determina cual es la capacidad del suelo para mantener la cohesión y la estructura estables frente a procesos físico-químicos de disgregación. Se puede definir como la resistencia que un suelo o regolito opone a ser destruido por la acción del agua. Ellison (1947) afirmó que la erosión comienza con la ruptura de un agregado en componentes individuales. Asimismo, Bryan (1968) y de Ploey y Poesen (1985), definieron la estabilidad de los agregados como una de las propiedades del suelo que controla la erodibilidad del mismo. Por otro lado, Imeson (1984) afirmó que la estabilidad de los agregados de un suelo es un parámetro sintético de las condiciones del ecosistema, debido a sus interacciones con la flora, la fauna, la roca madre y el clima. En este sentido, Bryan *et al.* (1978) consideran que el conocimiento de la estabilidad de los agregados puede servir como un indicador de la erodibilidad de los suelos, lo que aportará información sobre la dinámica hidro-geomorfológica del área de estudio.

Además, la estabilidad de los agregados juega un papel esencial en la dinámica hidrológica. La capacidad de retención hídrica y la erodibilidad del suelo están directamente relacionados con su estabilidad, ya que la pérdida de cohesión de los agregados favorece la acción erosiva del splash, lo cual acelera la activación de procesos que favorecen el encostramiento y, la consiguiente costra superficial

reduce notablemente la capacidad de infiltración en suelos y regolitos (McIntyre, 1958; Regüés y Gallart, 2004). Así, se puede afirmar que la estabilidad de los agregados es un indicador de los procesos geomorfológicos que actúan en un territorio (Cerdà, 1998).

Numerosos métodos han sido utilizados para estimar la erodibilidad del suelo; desde sencillos test de campo y laboratorio (test de la dispersión de Emerson) hasta sofisticadas pruebas como los ultrasonidos, además del desarrollo de complejos índices como el utilizado para el factor K en la Universal Soil Loss Equation (Whisemeier y Smith, 1978). Sin embargo, la comunidad científica admite las dificultades en la medición de la erodibilidad del suelo. De este modo, son muchos los investigadores que utilizan la estabilidad de los agregados para calcular y estimar dicha variable. Sin embargo, los métodos utilizados en la determinación de la estabilidad de los agregados presentan dificultades debido principalmente a la gran heterogeneidad del suelo y su estructura.

La estabilidad de los agregados está influenciada por muchos factores: usos del suelo, litología y clima principalmente; asimismo, la localización, el contenido de materia orgánica, las propiedades físico-químicas y la actividad biológica condicionan la estabilidad y resistencia de los agregados. Esto motiva que se trate de una propiedad sujeta a una elevada variabilidad espacial y temporal (Imeson y Jungerius, 1976).

El objetivo de este trabajo es estudiar la variabilidad espacial de la estabilidad de los agregados, en una pequeña cuenca de montaña, diferenciando dos zonas de estudio: una zona acarcavada, donde el estudio se realiza sobre muestras de regolito y marga poco alterada, en dos laderas con diferente exposición (norte y sur); y una zona forestal, donde se desarrolla un bosque de repoblación (*Pinus sylvestris* y *Pinus nigra*), situada junto a las zonas acarcavadas. Otros objetivos más específicos son: (i) comparar las dos técnicas de laboratorio: el test de la gota y el método de las rotaciones, e (ii) identificar la relación entre la estabilidad de los agregados y las propiedades físico-químicas de la roca (suelo).

## 2. Área de estudio

La cuenca experimental de Araguás está situada en la zona central de la Depresión Interior

Altoaragonesa, en el Pirineo Central, a 9 km de la ciudad de Jaca (Figura 1). Se trata de una pequeña cuenca (45 ha) con límites bien definidos que se caracteriza por mostrar ambientes típicos en el contexto de la Depresión. El gradiente altitudinal es 325 m, entre la divisoria (1105 m) y el punto más bajo (780 m). La pendiente media se aproxima al 20% y las mayores pendientes, próximas al 40%, se localizan en laderas con exposición norte (Nadal-Romero, 2008).

En el área de estudio existen tres zonas bien diferenciadas (Figura 1). En la parte baja hay un predominio de morfologías acarcavadas (27,2% del área total de la cuenca) (Figura 2A). La distribución de las cárcavas en la cuenca muestra una cierta asimetría, siendo más abundantes en laderas con exposición norte (aproximadamente el 60% del área total acarcavada). En estas zonas predomina una vegetación escasa de porte arbustivo y herbáceo con presencia de vegetación arbórea dispersa. En la zona alta de la cuenca se desarrolla un bosque

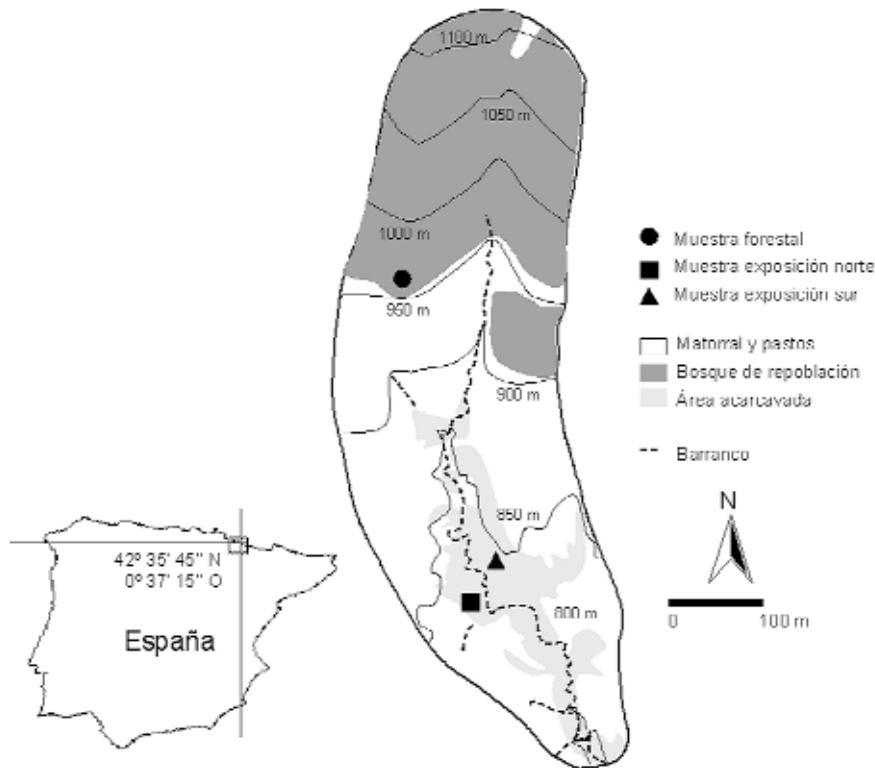


Figura 1. Localización del área de estudio. Cuenca de Araguás. Localización de los puntos de muestreo.  
 Figure 1. Map of the Araguás catchment showing the different land cover units and the locations of sampling points.

de repoblación forestal (27,5% de la superficie de la cuenca) (*Pinus sylvestris* y *Pinus nigra*), llevado a cabo a finales de la década de los 60 e inicios de los 70. El sotobosque (bien desarrollado) lo forman fundamentalmente el boj (*Buxus sempervirens*) y la aliaga (*Genista scorpius*) (Figura 2B). La superficie restante (45,3%) está repartida entre pastos y campos abandonados a mediados del siglo XX (Molinillo *et al.*, 1997), que actualmente están afectados por la recolonización natural de matorrales, especialmente *Genista scorpius*, *Buxus sempervirens* y *Rosa gr. canina* (Figura 2C).

La litología en la parte baja de la cuenca, donde se desarrollan las morfologías acaravadas, es la marga de Larrés (Marga Eocena), compuesta por calcita y dolomita (41%), minerales arcillosos como la clorita e illita (44%) y en menor proporción cuarzo (15%) (Figura 2A). También aparecen niveles de areniscas y concreciones carbonatadas más resistentes a la erosión (Martí-Bono y Plana, 1996). La dinámica de los procesos de meteorización y erosión determina la morfología y dinámica de las superficies acaravadas. La marga es una roca dura, pero muy susceptible a sufrir procesos de alteración física y química, asociados principalmente a las oscilaciones térmicas e hídricas o a la reducción del contenido de carbonatos (Nadal-Romero *et al.*, 2007). El regolito derivado de la alteración de la marga, es extremadamente frágil y susceptible a ser erosionado. Así, en este tipo de morfologías se han estimado tasas de erosión muy elevadas que ponen de manifiesto una rápida dinámica geomorfológica (Regüés *et al.*, 2000; Nadal-Romero *et al.*, 2006a, 2007).

En la parte superior de la cuenca, donde predomina la repoblación forestal (Figura 2B), el sustrato está constituido por turbiditas de la formación Flysch eoceno surpirenaico (areniscas carbonatadas y margas alternantes en estratos de potencia variable, entre centimétrica y decimétrica). La evolución de estas vertientes es muy diferente, ya que su dinámica solamente está asociada a eventos de tipo extraordinario, que desencadenan deslizamientos o movimientos en masa superficiales que evolucionan hacia coladas de derrubios (García-Ruiz y Puigdefábregas, 1982; Lorente *et al.*, 2002).

El clima, definido como submediterráneo de montaña (Creus y Gil, 2001), se caracteriza por una marcada estacionalidad pero con cierta influencia continental y atlántica. La precipitación media, en los últimos treinta años, ha sido 718,1 mm, con promedios anuales que oscilan entre 600 y 900 mm. El régimen pluviométrico muestra dos periodos lluviosos: otoño (máximo primario) y primavera. En verano son relativamente frecuentes las tormentas convectivas. Mientras en otoño y primavera predominan las lluvias ciclónicas, asociadas al paso de frentes y grandes borrascas. El invierno no es completamente seco (aproximadamente 180 mm de precipitación media) debido al paso frecuente de frentes por el norte de la Península Ibérica que ocasionan lluvias y precipitación en forma de nieve, cuya fusión es muy rápida en las zonas bajas. Las temperaturas muestran una clara distribución estacional, con una media anual de 10 °C, mínimas de hasta -14 °C y máximas que superan los 30 °C.



Figura 2. Cuenca de Araguás. A. Desarrollo de cárcavas en la parte baja de la cuenca. B. Área forestal en la parte superior de la cuenca. C. Prados, matorrales y campos abandonados en la parte media de la cuenca.

Figure 2. Araguás catchment. A. Badlands development in the lower part of the catchment. B. Forested area in the upper part of the catchment. C. Grassland, open shrubs and abandoned field in the central part of the catchment.

### 3. Metodología

#### 3.1. Test de la gota

La estimación de la estabilidad de los agregados frente al impacto de gotas de lluvia ha sido estudiada mediante diferentes técnicas sencillas (Mc Calla, 1944; Smith y Cernuda, 1951) entre las que ha destacado el denominado “Drop-Test” o “test de la gota” (Low, 1954) como la más difundida y utilizada. El test de la gota, también llamado CND “Counting the Number of Drops”, consiste en dejar caer gotas de agua de masa conocida y desde una altura constante. Cada impacto libera una cantidad de energía cinética, similar y calculada, sobre un agregado hasta que éste se rompe, tal y como describieron Imeson y Vis (1984). En definitiva, esta técnica pretende reproducir el proceso natural de destrucción de los agregados durante la lluvia, y con ella se puede estimar la resistencia ante precipitaciones de diversa intensidad y duración (Cerdà, 1998). Este test permite conocer el proceso de arranque del material y el transporte en forma de salpicadura.

El mecanismo de laboratorio consta de un recipiente lleno de agua (desionizada) situado a un metro de altura, el cual está conectado a la boquilla de una bureta. Las gotas de agua de 0,1 gramos de masa, previamente calibradas, caen a través de un tubo de 1 m de longitud (para evitar turbulencias y que las gotas impacten siempre en el mismo punto) hasta alcanzar el punto en el que se sitúa un agregado, que se encuentra sobre un tamiz metálico de 2 mm de luz de malla.

La metodología consiste en relacionar el número de impactos de gotas con la dispersión de un agregado. Se han contabilizado hasta 200 impactos, siendo este número el límite máximo que se ha establecido en este estudio, considerando las características físico-químicas del material. Se realizaron 25 repeticiones para caracterizar la respuesta de cada muestra. El procedimiento se repitió para agregados secos y húmedos (temperatura ambiente y capacidad de campo, respectivamente), con el fin de conocer su comportamiento en ambos estados: al inicio y durante la lluvia respectivamente. La medición se realizó con agregados de un diámetro comprendido entre 2,8 y 4,8 mm (con un tamaño medio de aproximadamente 4,4 mm). De este

modo, se seleccionaron aproximadamente 60 agregados de cada muestra: 25 de ellos se destinaron al estudio de la estabilidad estructural en seco, otros 25 en húmedo; y los 10 restantes se conservaron para posibles comprobaciones posteriores. Se colocó el agregado en un tamiz de 2 mm y se dejaron caer sobre él gotas de agua, contándolas una a una, bien hasta romper el agregado o hasta alcanzar el número máximo de impactos establecido previamente en 200.

Además, cada impacto transmite una determinada cantidad de energía, por lo que se ha considerado conveniente calcular la energía acumulada, mediante las mediciones de Epema y Riezebos (1983). Los resultados revelan que cada impacto de gota durante el test (0,1 g y un metro de altura) transmitió aproximadamente 0,00098 julios de energía.

Las muestras utilizadas en este ensayo corresponden a: (i) horizonte superficial (0-2 cm) del suelo de la zona forestal de la cuenca (repoblación de *Pinus sylvestris*); marga inalterada (0-5 cm) y regolito superficial. En todos los casos las muestras proceden de laderas representativas del área de estudio con exposiciones norte y sur (Figura 1). Se ha utilizado el horizonte orgánico del suelo y la capa superficial del regolito ya que son los que reciben el impacto de las gotas en condiciones naturales.

#### 3.2. Método de las rotaciones

El método de las rotaciones informa sobre la estabilidad de los agregados en condiciones semejantes a las que se produce su transporte fluvio-torrencial (Salvador Sanchís *et al.*, 2008). En este caso, se analizó el efecto de la persistencia del transporte mediante la aplicación de un número diferente de rotaciones a distintos grupos de agregados. Esta metodología fue aplicada solamente en muestras del suelo forestal y ambas exposiciones del regolito (norte y sur).

La metodología utilizada se basa en el humedecimiento por capilaridad de 30 gramos de muestra de suelo (capacidad de campo), previamente tamizada entre 0,5 y 8 mm. Las muestras utilizadas en este estudio corresponden a: el horizonte superficial del suelo (0-5 cm) de la zona forestal de la

cuenca (replacación de *Pinus sylvestris*) y el regolito (0-5 cm) norte y sur (Figura 1).

Una vez seleccionado el material, mediante el tamizado, se depositó en unas bandejas donde finalmente se hizo la selecciónde 30 g de muestra. Posteriormente, se introdujo la muestra en contenedores cerrados herméticamente (de 10 cm de altura y 10 cm de diámetro de la base) y se ańadió un total de 200 cm<sup>3</sup> de agua desionizada. Una vez cerrados los contenedores se acoplaron al rotor, con capacidad para 8 recipientes (Figura 3). La muestra se agitó durante un tiempo conocido (calculado previamente), dependiendo del número de ciclos aplicados (Salvador Sanchís *et al.*, 2008). Después del número de rotaciones previamente preestablecido para el estudio (en nuestro caso 20, 60, 180, 540 y 1600 rotaciones) el contenido del recipiente se transfirió a una torre de tamices. Normalmente son utilizados los siguientes tamices: 2000, 1000, 500, 250, 125 y 63 micras, pero con la muestra de la zona forestal además se utilizaron los tamices de 4000 y 8000 micras. A continuación, se lavó la

muestra con agua desionizada para facilitar el paso de los agregados a través del tamiz. El material obtenido se dejó secar en la estufa a 105 °C. Una vez seco el material, se pesaron los recipientes. Esta operación se repitió para cada tamaño de tamiz y para cada ciclo de energía aplicado.

Paralelamente, se pesaron 20 g de muestra y se aplicó un segundo procedimiento, utilizando los mismos ciclos de rotaciones establecidos previamente. Sin embargo, en este caso, una vez finalizadas las rotaciones, se pasaron las muestras únicamente por el tamiz de 63 micras, diferenciando sólo agregados mayores y menores de 63 micras. Los de mayor tamaño se secaron en la estufa, y el material más fino se colocó en una probeta de 1000 cm<sup>3</sup> de capacidad para diferenciar el material inferior a 10 micras mediante el método de la sedimentación.

Los datos relativos a la estabilidad estructural de los agregados se pueden describir en términos de dimensión de los agregados (diámetro D<sub>50</sub> correspondiente a la mediana de la distribución de

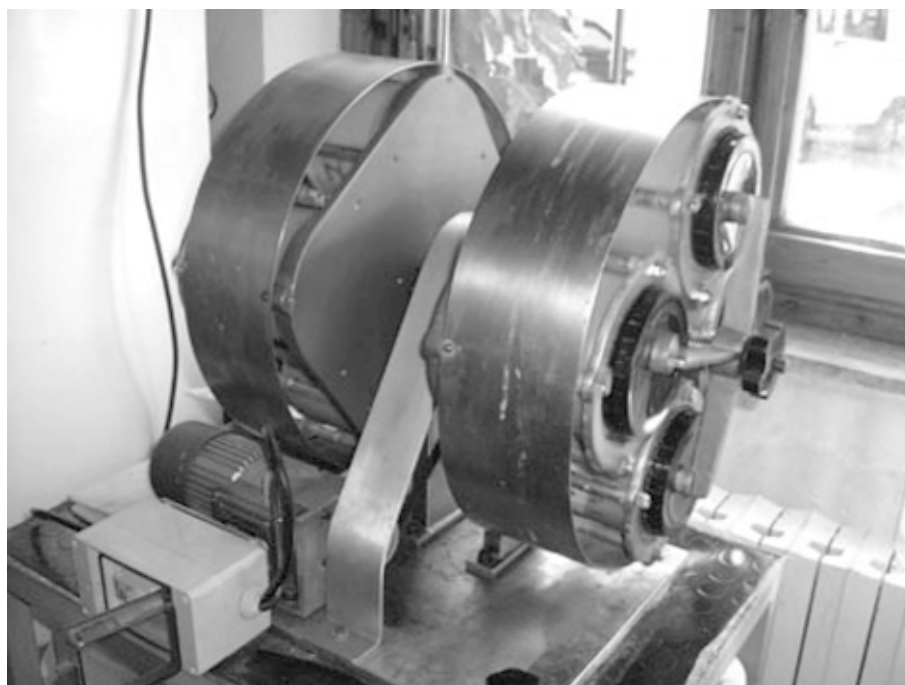


Figura 3. Rotor con capacidad para ocho contenedores. Método de las rotaciones. Laboratorio del “Istituto di Ricerca per La Protezione Hidrogeológica” (CNR-IRPI, Unidad asociada de Florencia).

Figure 3. Rotor with capacity for eight containers. Rotations Method. Laboratory: “Istituto di Ricerca per La Protezione Hidrogeológica” (CNR-IRPI, Unidad asociada de Florencia).

los agregados). Los datos han sido examinados según la siguiente curva de regresión (Salvador Sanchís *et al.*, 2008):

$$D_{50} = a - b \cdot \frac{E}{D_{50}}$$

Donde el significado físico de los símbolos es el siguiente:  $a$  ( $\mu\text{m}$ ), valor final del  $D_{50}$  y no puede ser inferior al diámetro mediano de la textura;  $b$  ( $\mu\text{m}$ ), diferencia entre el valor inicial y el final de  $D_{50}$ ;  $Kd$ , resistencia ofrecida por los agregados a ser reducidos de dimensión durante el test;  $E$  ( $\text{J m}^{-2}$ ), energía total aplicada;  $D_{50}$  ( $\mu\text{m}$ ), diámetro correspondiente a la mediana de la distribución de los agregados.

Para el análisis de los datos adquiridos a partir de este procedimiento se realizó un estudio de la distribución del tamaño de los agregados residuales (en las 7 categorías obtenidas a partir de los 6 tamices utilizados) y el cálculo por interpolación del diámetro mediano de los agregados ( $D_{50}$ ), que se toma como el parámetro guía para determinar su estabilidad (Salvador Sanchís *et al.*, 2008).

### 3.3. Análisis físico-químico

(i) El análisis de la materia orgánica se ha realizado mediante el método del dicromato potásico (Jackson, 1982), aplicando la siguiente fórmula:

$$\%MO = \%C \times 1,724$$

Donde  $\%MO$  es el porcentaje de materia orgánica y  $\%C$  es el porcentaje de carbono orgánico y 1,724 es el factor de corrección para transformar el carbono total en materia orgánica.

(ii) La medición del nitrógeno del suelo ha sido realizado mediante el método de combustión usando un *Vario Max analyzer* (Elementar, Hanu, Germany).

(iii) El pH se ha medido mediante una disolución acuosa (concentración 1:2,5 en masa) con un pH-metro (Crison MicroPH 2001).

(iv) La determinación de la conductividad eléctrica se realiza por conductimetría. Para ello, se recurre a la medida de la conductividad eléctrica (CE) de un extracto de suelo diluido en agua destilada en proporción 1:5 con un conductímetro en el laboratorio (Crison MicroCM 2202).

(v) El método utilizado para la determinación del contenido en carbonato ha sido el calcímetro de Bernard (Skinner *et al.*, 1959), que está basado en la determinación gasométrica del  $\text{CO}_2$  que se desprende de la reacción que experimentan los carbonatos al diluirse en ácido clorhídrico 1:1. La cantidad de carbonato se calcula a partir de la fórmula:

$$\text{CaCO}_3 = \left( \frac{V_0 \cdot P'}{V_c \cdot P} \right)$$

Donde  $V_0$  es el volumen de  $\text{CO}_2$  que ha desprendido la muestra,  $V_0'$  es el volumen de  $\text{CO}_2$  que ha desprendido el patrón,  $P'$  es el peso de Carbonato Cálcico utilizado para el patrón y  $P$  es el peso de la muestra.

(vi) Para conocer el valor de la densidad aparente, se toman muestras de 0-5 cm de profundidad con un volumen constante. El muestreo se realiza mediante un tubo de acero inoxidable, cuyo diámetro interior es de 29 mm. Así, el cálculo de la densidad aparente se obtiene a partir de la relación entre un volumen conocido ( $33,03 \text{ cm}^3$ ) y la masa seca de materia sólida que lo ocupa.

## 4. Resultados

### 4.1. Test de la gota

Los resultados del test de la gota son presentados en forma de curvas acumulativas (Figuras 4 y 5), donde se relaciona el número de impactos de gota con el porcentaje de agregados destruidos y la cantidad de energía acumulada para la destrucción de dichos agregados. Además, la Tabla 1 presenta los valores estadísticos de los resultados obtenidos en el test, referidos al número de impactos de gota.

Por otro lado, en el análisis de los resultados se han diferenciado los ensayos realizados con agregados secos (Figura 4) y en estado de saturación (Figura 5), con el fin de conocer el efecto de la humedad sobre su cohesión y resistencia.

De manera general se observó: (i) un amplio rango de resultados en el total de las muestras; (ii) los agregados tienden a ser más estables cuando están húmedos que cuando están secos; y (iii) una alta resistencia de los agregados procedentes del área forestal, resistencia media de las margas poco alteradas y baja resistencia del regolito de la zona acarcavada.

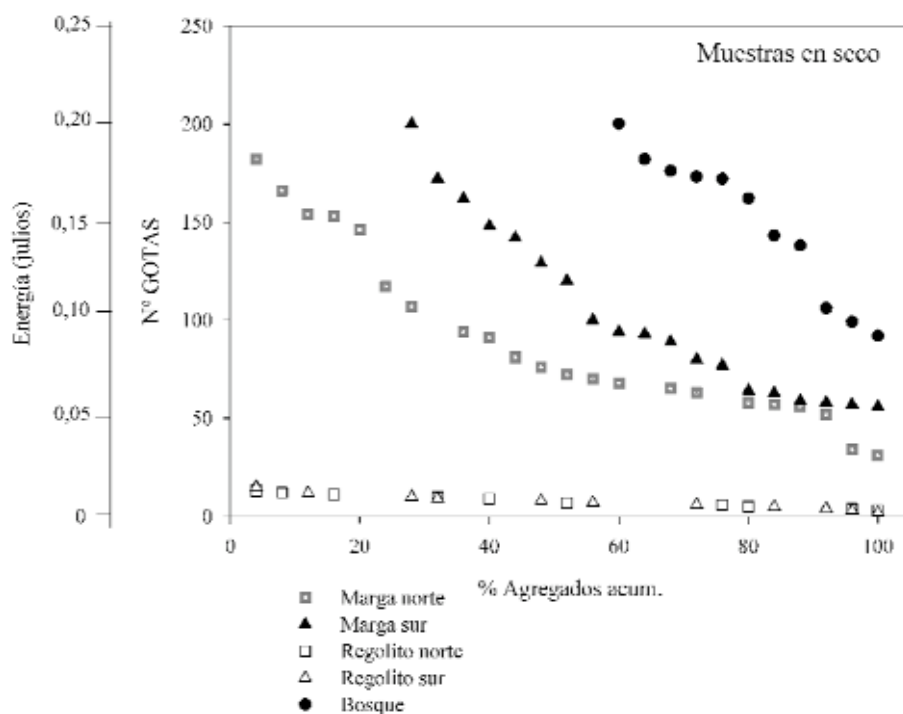


Figura 4. Resultados del test de la gota en seco. Curvas acumulativas que relacionan el porcentaje de agregados que resisten una determinada energía (impactos de gotas transformados en energía) en condiciones secas.

Figure 4. Drop test results in dry conditions. Accumulative curves that connect the percentage of resistant aggregates with the number of drops and determined energy in dry conditions.

Los suelos de la zona forestal presentan la mayor estabilidad de los agregados y, aunque se observan diferencias entre la resistencia de los agregados secos y húmedos, son menores a las registradas con agregados de las zonas acarcavadas. En seco los valores oscilan entre 92 y 200 impactos, con un promedio igual a 178; mientras en húmedo, los valores oscilan entre 64 y 200 impactos con un promedio de 188 impactos.

La marga poco alterada en vertiente sur también presenta valores elevados de resistencia (valor medio igual a 126,5 impactos). Las diferencias entre seco y húmedo son bastante más significativas que en el caso anterior. Alrededor del 40% de los agregados en seco resistieron cerca de 150 impactos (aproximadamente 0,15 julios de energía); mientras en húmedo más del 80% de los agregados resistieron este número de impacto.

De manera general, la marga norte ha revelado una resistencia similar en condiciones secas y húmedas hasta un cierto umbral (100 impactos). A

partir de este punto, el porcentaje de agregados resistentes en seco es mucho más bajo que en húmedo. Los valores oscilan entre 26 y 200 impactos, con un valor medio de 100 impactos aproximadamente, lo que provoca altos coeficientes de variación (0,5 en seco y 0,7 en húmedo). Asimismo, la resistencia de los agregados en exposición norte es inferior que en exposición sur.

En el caso de los regolitos (norte y sur) se observó que la estabilidad de los agregados es muy baja (valores medios inferiores a 10 impactos). En condiciones secas, en ambas exposiciones, el valor medio fue muy similar, siempre por debajo de los 8 impactos. En cambio se observaron diferencias en condiciones de humedad antecedente: en las muestras de regolito norte, la estabilidad de los agregados fue mayor en condiciones de humedad (9,8); sin embargo, se puede destacar, que en el regolito sur la estabilidad de los agregados es similar en seco y en húmedo (7,44 y 7,32) (Tabla 1).



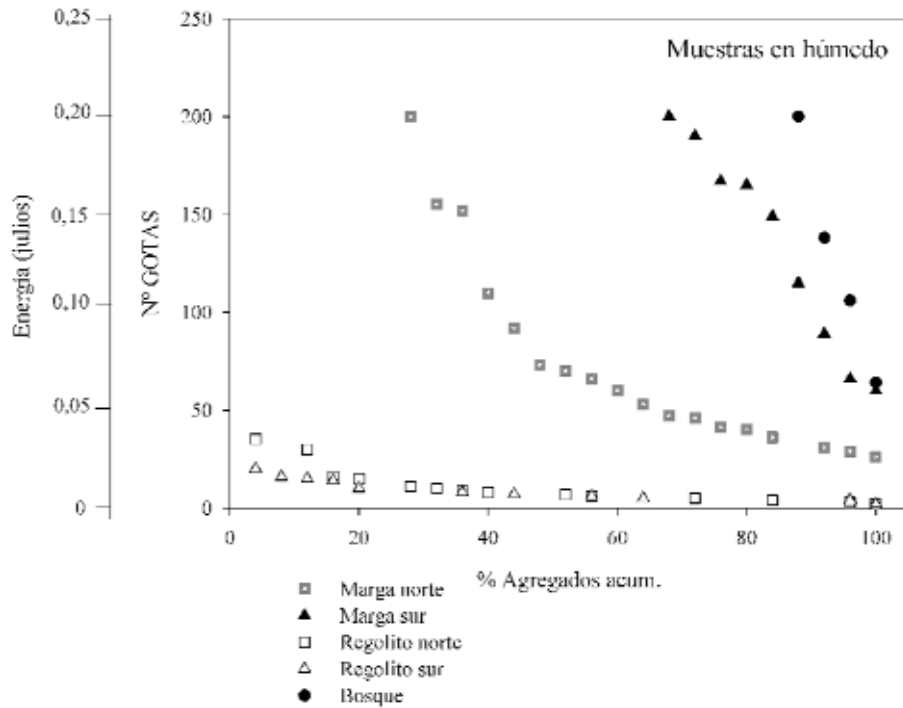


Figura 5. Resultados del test de la gota en húmedo. Curvas acumulativas que relacionan el porcentaje de agregados que resisten una determinada energía (impactos de gotas transformados en energía) bajo condiciones de humedad previa antes del ensayo. Figure 5. Drop test results in wet conditions. Accumulative curves that connect the percentage of resistant aggregates with the number of drops and a determined energy, with previous wet conditions.

En los regolitos margosos muy alterados, la rápida destrucción de los agregados, se debe principalmente a la elevada capacidad de dispersión de las partículas de arcilla. El comportamiento observado en las margas o regolitos muy alterados es similar a los obtenidos por otros autores en áreas acarcavadas, en condiciones similares (Imeson y Verstraten, 1988; Cerdà, 1993, 1996; Regüés, 1995).

#### 4.2. Método de las rotaciones

De manera general, los resultados obtenidos mediante este test mostraron diferencias similares a las observadas a partir del test de la gota. Las Figuras 6 (a, b y c) presentan la relación entre la energía cinética acumulada ( $E$ ,  $J m^{-2}$ ) y el diámetro mediano ( $D_{50}$ ,  $\mu m$ ) de los agregados rotos para un valor de energía dado. Se observa: (i) una mayor

estabilidad de los agregados de la zona forestal ( $Kd$  máximo: 592,83) y (ii) un descenso de la resistencia de los agregados tomados en el regolito, en ambas exposiciones. No obstante, presentaron una resistencia mayor los agregados de exposición sur ( $Kd$  igual a 305,43) que la observada en los agregados procedentes de laderas norte ( $Kd$  igual a 176,19).

#### 4.3. Propiedades físico-químicas

Las propiedades físico-químicas de las muestras están expuestas en la Tabla 3. Los resultados analíticos, obtenidos en el laboratorio muestran diferencias significativas entre los materiales de la zona forestal y la zona acarcavada. Estas diferencias son especialmente acentuadas en los valores de materia orgánica y en la presencia de carbonatos (Tabla 3).

Tabla 1. Media, mediana, valores máximos y mínimos, desviación Standard y coeficiente de variaciones, de los resultados obtenidos mediante el test de la gota, en condiciones secas y húmedas.

Table 1. Mean, median, maximum and minimum values, Standard deviation and variation coefficient of the results obtained through drop test in dry and wet conditions.

<i>Test en seco</i>	<i>Bosque</i>	<i>Marga Norte</i>	<i>Marga Sur</i>	<i>Regolito Norte</i>	<i>Regolito Sur</i>
Media	177,72	94,08	126,52	7,44	7,44
Mediana	200	76	120	7	7
Máximo	200	200	200	13	15
Mínimo	92	31	56	3	2
Desviación Standard	34,91	46,89	56,93	2,84	3,08
Coeficiente de variación	0,2	0,5	0,45	0,38	0,41

<i>Test en húmedo</i>	<i>Bosque</i>	<i>Marga Norte</i>	<i>Marga Sur</i>	<i>Regolito Norte</i>	<i>Regolito Sur</i>
Media	188,32	102,32	176,04	9,8	7,32
Mediana	200	70	200	7	6
Máximo	200	200	200	35	20
Mínimo	64	26	60	2	2
Desviación Standard	34,01	70,5	44,61	9,02	4,48
Coeficiente de variación	0,18	0,69	0,25	0,92	0,61

(i) La zona forestal presenta valores elevados de materia orgánica, propios de un ambiente vegetal más rico y suelos más evolucionados, además de un elevado porcentaje de carbonatos, condicionado claramente por el material litológico (marga de Larrés y flysch eoceno). También, se registra la relación más elevada de Carbono/Nitrógeno y los valores más bajos de pH y conductividad eléctrica (Tabla 3).

(ii) Los análisis de los materiales de la zona acarcavada (Tabla 3) indican:

Un elevado porcentaje de arcillas y carbonatos en la mineralogía del material.

El porcentaje de materia orgánica en el regolito (alrededor del 1%) es más de tres veces menor al cuantificado en los suelos forestales de la misma zona.

Los valores de la relación C/N sugieren que el proceso de descomposición de la materia orgánica es relativamente rápido.

Los valores de pH son moderadamente básicos y en determinados puntos (en profundidad principalmente) ligeramente alcalinos. La presencia de valores de pH y conductividad eléctrica más elevados en las laderas con exposición sur, sugieren un menor lavado de los materiales en superficie, donde la mayor radiación y, consecuentemente la

mayor evaporación, favorece el déficit hídrico y la migración de sales hacia las capas superficiales.

El material litológico (marga de Larrés) condiciona claramente el elevado contenido de carbonato cálcico en el regolito, destacando un contenido algo menor en los estratos superficiales en las vertientes orientadas hacia el norte, como consecuencia del lavado superficial, y los porcentajes algo mayores en las vertientes orientadas hacia el sur, donde predomina la evaporación. En este sentido, el proceso general de la acumulación de sales en el suelo, va unido a las características climáticas con un predominio de la evaporación sobre la pluviosidad o, lo que es equivalente, un balance hídrico negativo.

Por último, se puede destacar que la muestra recogida en el área forestal presenta los valores más bajos de densidad aparente ( $1,35 \text{ g cm}^{-3}$ ), mientras los más altos corresponden a la muestra recogida en la ladera sur ( $1,76 \text{ g cm}^{-3}$ ) (Tabla 3). Sin embargo, en trabajos previos se ha observado que la densidad aparente varía a lo largo del año, especialmente en exposición norte, con valores mínimos en invierno de  $0,85 \text{ g cm}^{-3}$ , y valores máximos en verano próximos a  $2 \text{ g cm}^{-3}$  (Nadal-Romero *et al.*, 2007).

Tabla 2. Cálculo de la resistencia (Kd) ofrecida por los agregados a ser reducidos de dimensión durante el test de las rotaciones.  
 Table 2. Resistance estimation of the aggregate to be reduced of dimension during the rotation method.

	<i>Kd</i>
Bosque (horizonte superficial)	592,83
Regolito exposición norte	176,19
Regolito exposición sur	305,43

#### 4.4. Relaciones entre la estabilidad de los agregados y las propiedades físico-químicas

La estabilidad de los agregados fue relacionada con las propiedades físico-químicas para clarificar cuáles son las de mayor relevancia en el comportamiento de los agregados. Sin embargo, debido al elevado número de variables y al número limitado de muestras no se han podido establecer regresiones o correlaciones estadísticas que establecieran un modelo de comportamiento entre el total de las variables.

En la zona forestal los agregados presentan valores muy altos de resistencia. Esta resistencia está relacionada con los mayores porcentajes de materia orgánica y de carbonatos. Así, en la zona forestal de la cuenca de Araguás, la presencia de un bosque de repoblación y de un denso sotobosque (Figura 2B) favorece una elevada proporción de materia orgánica en el suelo (3,9%) y contribuye a una mejor conservación de la estructura y la porosidad, lo que reduce la densidad aparente (1,35 g cm<sup>-3</sup>). Contrariamente, en la zona acarcavada la estabilidad de los agregados y los porcentajes de materia orgánica y de carbonatos son moderadamente más bajos (en torno a 1%), por ello los valo-

res de densidad aparente pueden ser bastante más elevados, especialmente cuando el regolito se encuentra poco alterado (Nadal-Romero *et al.*, 2006a, 2007).

Por otro lado, los carbonatos constituyen un elemento fundamental en la matriz de algunas rocas y, a su vez, actúan como “cemento”, de manera que su presencia preserva la cohesión y resistencia de las rocas, motivando su disolución el efecto contrario. De este modo, un alto porcentaje de carbonatos y de materia orgánica favorece una mayor estabilidad de los agregados.

### 5. Discusión

El estudio de la estabilidad de los agregados es complejo, ya que dicha propiedad está controlada por diferentes factores, especialmente las condiciones climáticas, la litología, la vegetación y la actividad biológica.

Las dos técnicas analíticas utilizadas en este estudio, mostraron resultados similares, siendo ambas técnicas adecuadas para el estudio que se ha realizado. La combinación de los dos métodos de análisis es beneficiosa para el estudio, pues informan sobre distintas componentes de la resistencia

Tabla 3. Propiedades físico-químicas de las muestras recogidas en la cuenca de Araguás. Horizonte superficial de la zona forestal; muestras tomadas en laderas representativas con diferente exposición Norte y sur (0-5 cm).

Table 3. Physico-chemical properties of the soil samples collected in the Araguás catchment. From superficial horizons (0-5 cm) in the forestry area and the representative opposite expositions in badland areas (north- and south-facing slopes).

<i>Propiedades físico-químicos</i>	<i>Bosque</i>	<i>Norte</i>	<i>Sur</i>
pH	8,03	8,11	8,42
CE (mS/cm)	0,187	0,245	1,480
% MO	3,90	1,05	1,08
% CO <sub>3</sub> Ca	40,09	28,76	29,27
Relación Carbono-Nitrógeno	10,97	10,02	8,61
Densidad aparente	1,35	1,45	1,76

(impacto y arrastre por escorrentía). Sin embargo, el método más conveniente para evaluar rápidamente la estabilidad de los agregados ha sido el test de la gota (CND, "Counting the Number of Drops"). Por otro lado, el método de las rotaciones, requiere un equipamiento mayor y, además, el proceso en el laboratorio es más lento y costoso. Por lo tanto se aconseja, en caso de ser necesario utilizar sólo un método, utilizar el más ágil y eficiente: el drop-test.

En general, los resultados demostraron diferencias bastante importantes en relación con las características de los usos de suelo y la cubierta vegetal de las zonas estudiadas. Así, la estabilidad de los agregados es mayor en el área forestal; mientras la marga poco alterada ocupa un lugar intermedio, observándose algunas diferencias entre las exposiciones norte y sur; y por último, la estabilidad de los agregados de los regolitos superficiales (norte y sur) es bajísima y además, en este caso, no se observaron diferencias significativas de comportamiento entre ambas exposiciones.

Como ya han indicado algunos autores, la materia orgánica es una de las variables de mayor influencia en la estabilidad de los agregados (Tisdal y Oades, 1982; Sparling *et al.*, 1992; Oades, 1993; Philips y Robinson, 1998), además de favorecer la microestructura del suelo (Farres, 1987). Philips y Robinson (1998) demostraron que existe una correlación positiva entre la materia orgánica y la estabilidad de los agregados; y Oades (1988) señaló que un 2% de materia orgánica es un umbral importante y significativo en la estabilidad de los agregados. Por otro lado, los resultados obtenidos por Cerdà (1996) señalaron la influencia positiva de la vegetación en la estabilidad de los agregados, interactuando además con otros factores, como las condiciones climáticas o la actividad humana. Así la vegetación, favorece la presencia de materia orgánica y beneficia la conservación de la estructura y la porosidad del suelo. Boix-Fayos *et al.* (1998) demostraron que los agregados son más estables en espacios cubiertos por vegetación que en suelos desnudos, aunque los agregados en los suelos desnudos sean de mayor tamaño. Así, la presencia de vegetación favorece el aumento de la materia orgánica en el suelo y contribuye a conservar su porosidad; de este modo, se reducen los procesos de encostramiento, además de preservar la estructura y la per-

meabilidad. Todo ello es positivo para mantener una buena actividad biológica, la cual favorece una mayor estabilidad de los agregados.

La litología es otro de los factores condicionantes de la estabilidad de los agregados. Los resultados obtenidos en estudios previos (Nadal-Romero *et al.*, 2006b, 2007; Nadal-Romero, 2008) señalaron que las litologías margosas sobre las que se desarrollan las cárcavas son muy susceptibles a los procesos de meteorización y erosión. Así, este estudio corrobora estos resultados, comprobando que la resistencia de los agregados del regolito al impacto de las gotas de lluvia es muy baja, y su desintegración se produce tras unos pocos impactos. Este resultado coincide con resultados obtenidos en otros estudios realizados en regolitos desarrollados en litologías margosas (Sanroque *et al.*, 1990; Ternan *et al.*, 1994; Cerdà, 1996). En consecuencia, en este caso es evidente que la estabilidad de los agregados afecta directamente a la intensidad y eficacia con que actúan los procesos de erosión y los procesos de encostramiento. Una dinámica superficial rápida e intensa que afecta directamente a las propiedades físicas y, como consecuencia, a la intensidad con que actúan algunos procesos. Así, en cárcavas se han observado importantes variaciones de la capacidad de infiltración (Regüés y Gallart, 2004; Nadal-Romero y Regüés, 2009) y de la intensidad de la escorrentía superficial o su capacidad erosiva (Mwendera y Reyen, 1993; Regüés y Torri, 2002). Por lo tanto, se puede considerar que la estabilidad de los agregados y la susceptibilidad a la erosión son inversamente proporcionales.

Un claro ejemplo se produce en las cárcavas de la Depresión Interior Altoaragonesa, donde los estudios desarrollados en la cuenca de Araguás han revelado que el regolito superficial está afectado por una dinámica superficial extremada, especialmente elevada en las vertientes con orientación norte (Nadal-Romero *et al.*, 2007). En estas áreas se ha observado que la estabilidad de los agregados es muy baja. Como consecuencia de esto, estas morfologías acarcavadas muestran respuestas hidrológicas y sedimentológicas muy extremas (Nadal-Romero *et al.*, 2006b, 2008a). En este sentido, Imeson y Verstraten (1985) también han observado que las margas, especialmente, en áreas degradadas del Sureste de España, presentan una baja estabilidad, aunque en este caso está más aso-

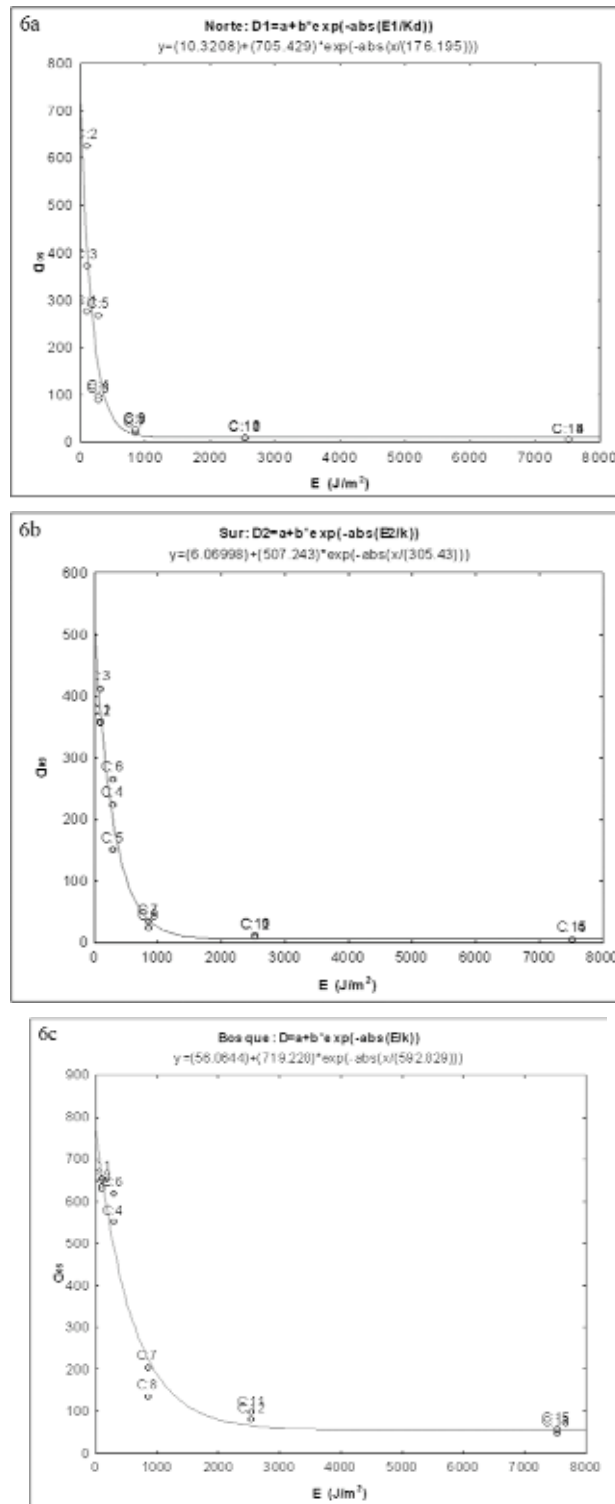


Figura 6. Resultados del método de las rotaciones. Relación entre la energía acumulada y el diámetro mediano ( $D_{50}$ ) de los agregados.  
 Figure 6. Rotations methods results. Relationship between the accumulated energy and the average diameter ( $D_{50}$ ) of the aggregates.

ciada a una elevada capacidad de dispersión que a la acción intensa de procesos, tal y como sucede en las cárcavas desarrolladas en ambientes húmedos de montaña (Regüés *et al.*, 2000).

Otro de los puntos de interés, en este estudio, ha sido diferenciar el comportamiento de la estabilidad de los agregados en condiciones secas y condiciones de humedad antecedente. El test de la gota demostró que la estabilidad de los agregados es mayor en materiales inicialmente húmedos, tal y como se ha observado en otros estudios similares (Boix-Fayos *et al.*, 1998, 2001; Molina *et al.*, 1999). El proceso de ruptura del agregado en seco se produce por causa de la compresión del aire atrapado en los poros como consecuencia de la entrada de agua en dicho agregado. La presión ejercida por el aire atrapado en los poros provoca que el agregado “explote”. Este proceso no ocurre con los agregados húmedos, en los que los poros están ocupados por agua y la diferencia de presión entre el frente de humedad y el interior del agregado es mínima (Cerdà, 1994). Así, la menor estabilidad de suelos secos, sugiere que las pérdidas de suelo por erosión tienen que ser mayores en ambientes semi-áridos que en medios húmedos, donde la humedad y el contenido hídrico es mayor durante la mayor parte del año (Martínez-Mena *et al.*, 1998). Además, la reducida porosidad de algunos materiales procedentes de áreas muy degradadas (áreas acaravadas principalmente), puede provocar que el material sea más estable en seco que en húmedo (habitualmente por procesos dispersivos) (Cerdà, 1994). En estos casos, el proceso de dispersión de arcillas, favorece una rápida ruptura de los agregados húmedos (Gerits, 1991; Cerdà, 1996), como se observa en alguno de los casos de estudio. Todo esto implica, que durante eventos de precipitación, la erodibilidad de los suelos será mayor al principio de la tormenta, cuando la superficie está seca. Así, se ha observado que la erosión por salpicadura es más eficiente cuando el suelo o el regolito presenta un bajo contenido de humedad, aunque también se ha observado que esto sucede principalmente en superficies relativamente irregulares y con una estructura porosa, puesto que las superficies encostadas incrementan bastante la resistencia mecánica, debido a la elevada densidad de la capa más superficial (Regüés y Torri, 2002). En cualquier caso, algunos autores han interpretado el descenso

de la concentración de sedimentos a lo largo de un evento (Abrahams *et al.*, 1988) como el descenso de la erodibilidad del suelo durante dicho evento, aunque hay que tener en cuenta que hay otros factores que también pueden explicar un descenso de concentración, como puede ser un efecto de dilución, asociado a la reducción progresiva de abanicos de acumulación al pie de las vertientes, o la eliminación del sedimento acumulado en el cauce e incluso la incorporación de agua limpia procedente de áreas vegetadas (Nadal Romero *et al.*, 2008b).

## 6. Conclusiones

La estabilidad de los agregados es un elemento importante como indicador de la erodibilidad y del grado de degradación de los diferentes ecosistemas naturales; pero no se debe olvidar que en ambientes de cárcavas (altamente dinámicos) la dinámica geomorfológica está regida por una gran cantidad de procesos (meteorización, erosión y transporte) con una dinámica estacional muy marcada (Nadal-Romero, 2008).

Los métodos, utilizados en este trabajo, son complementarios, y la combinación de las dos técnicas de análisis es beneficiosa para el estudio, pues informan sobre distintos componentes de la resistencia (impacto y arrastre). Sin embargo, en caso de tener que utilizar uno es preferible el test de la gota por la mayor simplicidad y rapidez con que se puede aplicar.

Los resultados confirman que el contenido hídrico es un factor determinante en la resistencia de agregados, tanto los del suelo como los de los regolitos. Sin embargo, este efecto es menor cuanto mayor es el grado de alteración del regolito.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado con el apoyo de los siguientes proyectos: “Procesos y balances de sedimentos a diferentes escalas espaciales en ambientes mediterráneos: Efectos de las fluctuaciones climáticas y los cambios de uso del suelo (CGL2006-11619/HID) y “Comportamiento y modelización espacio temporal de la transferencia de sedimento en distintos usos del suelo” (CET-

SUS, CLG2007-66644-C04-01) ambos financiados por la CICYT (Ministerio de Educación y Ciencia) y “Desarrollo y validación de modelos acoplados hidrológicos e hidráulicos en cuencas a diferentes escalas espaciales“ (PI032/2008) financiado por la Diputación General de Aragón (DGA). La monitorización de la cuenca también ha sido financiada mediante el proyecto RESEL (CSIC y Ministerio de medio ambiente). Asimismo, el primer autor cuenta con un contrato postdoctoral del Ministerio de Ciencia e Innovación, mediante el Programa Nacional de Movilidad de Recursos Humanos del Plan nacional de I-D+I 2008-2011. Este trabajo fue posible gracias a una estancia breve realizada por el primer autor (I3P) en el Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica (CNR, Florencia). Los autores desean expresar su agradecimiento a Carlos Martí-Bono, Noemí Lana-Renault, Pilar Serrano, Jérôme Latron, Silvia Presa, Ignasi Queralt, Elena Lahoz y Melchor Maestro por su colaboración en distintas labores. Por último, los autores agradecen la dedicación e interés con que los revisores han analizado y corregido el manuscrito.

## Referencias bibliográficas

- Abrahams, A.D., Parsons, A.J. & Luk, S.H. (1988). Hydrologic and sediment responses to simulated rainfall on desert hillslopes in southern Arizona. *Catena*, 15 (2), 103-117.
- Boix-Fayos, C., Calvo-Cases, A., Imeson, A.C. & Soriano-Soto, M.D. (2001). Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators. *Catena*, 44 (1), 47-67.
- Boix-Fayos, C., Calvo-Cases, A., Imeson, A.C., Soriano-Soto, M.D. & Tiemessen, I.R. (1998). Spatial and short-term temporal variations in runoff, soil aggregation and other soil properties along a Mediterranean climatological gradient. *Catena*, 33 (2), 123-138.
- Bryan, R.B. (1968). The development, use and efficiency of indices of soil erodibility. *Geoderma*, 2 (1), 5-26.
- Bryan, R.B., Yair A. & Hodges, W.K. (1978). Factors controlling the initiation of runoff and piping in Dinosaur Provincial Park badlands, Alberta, Canada. *Geomorphology*, 29, 151-168.
- Cerdà, A. (1993). Estabilidad de agregados en suelos degradados. País Valenciano. *Nuevos Procesos Territoriales*, 187-192.
- Cerdà, A. (1994). Aplicación del test de la gota y de la dispersión por ultrasonidos para la determinación de la estabilidad de los agregados en suelos sobre calizas afectados por fuego. *Cuaternario y Geomorfología*, 8 (12), 69-85.
- Cerdà, A. (1996). Soil aggregate stability in three Mediterranean environments. *Soil Technology*, 9 (3), 133-140. doi: 10.1016/S0933-3630(96)00008-6.
- Cerdà, A. (1998). El clima y el hombre como factores de la estabilidad estructural del suelo. Un estudio a lo largo de gradientes climático-altitudinales. *Cuaternario y Geomorfología*, 12 (3-4), 3-14.
- Creus, J. & Gil, M. (2001). Clima. En: *El medio físico y su peligrosidad en un sector del Pirineo Central*. Madrid, Instituto Geológico y Minero de España. Ministerio de Ciencia y Tecnología; 39-41.
- de Ploey, J. & Poesen, J. (1985). Aggregate stability, runoff generation and interrill erosion. En: *Geomorphology and Soils* (K.S. Richards, R.R. Arnett, R.R., S. Ellis, Eds.). George Allen & Unwin, London, 99-120.
- Ellison, W.D. (1947). Soil Erosion Studies. Parts I-VII. *Agricultural Engineering*, 28, 5-442.
- Epema, G.F. & Riezebos, T.H. (1983). Fall velocity of water-drops at different heights as a factor influencing erosivity of simulated rain. En: *Rainfall Simulation, runoff and Soil Erosion* (J. De Ploey, Eds.) *Catena Supplement*, 4, 1-17.
- Farres, P.J. (1987). The dynamics of rainsplash erosion and the role of soil aggregate stability. *Catena*, 14 (1-3), 119-130.
- García-Ruiz, J.M. & Puigdefábregas-Tomás, J. (1982). Formas de erosión en el Flysch Eoceno surpirenaico. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 8, 85-130.
- Gerits, J.J.P. (1991). *Physico-chemical thresholds for sediment detachment, transport and deposition*. Universiteit van Amsterdam, Amsterdam, 186 pp.
- Imeson, A.C. (1984). An eco-geomorphological approach to the soil degradation and erosion problem. En: *Desertification in Europe* (R. Fantechi, N.S. Margaris, Eds.). D. Reidel publishing Co. Dordrecht, 110-125.
- Imeson, A.C. & Jungerius, P.D. (1976). Aggregate Stability and Colluviation in the Luxembourg Ardennes; an Experimental and Micromorphological Study. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1 (3), 259- 271. doi: 10.1002/esp.3290010307.
- Imeson, A.C. & Verstraten, J.M. (1985). The erodibility of highly calcareous soil material from southern Spain. *Catena*, 12 (4), 291-306.
- Imeson, A.C. & Verstraten, J.M. (1988). Rills on badland slopes: a physico-chemical controlled phenomenon. *Catena Supplement*, 12, 139-150.
- Imeson, A.C. & Vis, M. (1984). Assessing soil aggregate stability by water-drop impact and ultrasonic dispersion. *Geoderma*, 34 (3-4), 185-200.
- Jackson, M.L. (1982). *Análisis Químico de Suelos*. Ed. Omega, 4ª edición. Barcelona, 662 pp.
- Lorente, A., García-Ruiz, J.M., Beguería, S. & Arnáez, J. (2002). Factors explaining the spatial distribution of hillslope debris flows. *Mountain Research and Development*, 22 (1), 32-39.
- Low, A.J. (1954). The study of soil structure in the field and laboratory. *Journal of Soil Science*, 5, 57-74.
- Martí-Bono, C. & Plana, F. (1996). Concreciones carbonatadas en margas del Eoceno. Consecuencias geomorfológicas. En: *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe* (A. Grandal, L. Pagés, Eds.), 604-615.

- Martínez-Mena, M., Williams, A.G., Ternán, J.L. & Fitzjohn, C. (1998). Role of antecedent soil water content on aggregates stability in a semi-arid environment. *Soil & Tillage Research*, 48 (1-2), 71-80. doi: 10.1016/S0167-1987(98)00131-7.
- Mc Calla, T.M. (1944). Waterdrop method of determining the stability of soil structure. *Soil Science*, 58, 117-123.
- Mc Intyre, D.S. (1958). Permeability measurements of soil crust formed by raindrop impact. *Soil Science*, 85, 185-189.
- Molina, M.J., Llinares, J.V. & Soriano, M.D. (1999). *La Degradación de las Propiedades del Suelo en Dos Sistemas Agroforestales de la Comunidad Valenciana: implicaciones Ecológicas Ante el Cambio Climático y Argumentos para la Planificación*. Geoforma: Logroño, 83 pp.
- Molinillo, M., Lasanta, T. & García-Ruiz, J.M. (1997). Managing mountainous degraded landscapes after farmland abandonment in the Central Spanish Pyrenees. *Environmental Management*, 21 (4), 587-598. doi: 10.1007/S002679900051.
- Mwendera, E.J. & Reyen, J. (1993). Estimation of depression storage and Mannin's resistance coefficient from random roughness measurements. *Geoderma*, 52, 235-250.
- Nadal-Romero, E. (2008). *Las áreas de cárcavas (badlands) como fuente de sedimento en cuencas de montaña: procesos de meteorización, erosión y transporte en margas del Pirineo Central*. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza, 434 pp.
- Nadal-Romero, E., Regüés, D., Martí-Bono, C. & Serrano, P. (2006a). Dinámica estacional de los procesos de meteorización en cárcavas del Pirineo Central. *Cuaternario y Geomorfología*, 20 (1-2), 61-77.
- Nadal-Romero, E., Regüés, D., Latron, J., Lana-Renault, N., Serrano-Muela, P. & Martí-Bono, C. (2006b). Impacto hidrológico y sedimentológico de las morfologías acarcavadas en la Depresión Interior Altoaragonesa (Pirineo Central). En: *Geomorfología y Territorio*. Actas de la IX Reunión Nacional de Geomorfología (A. Pérez Alberti, J. López-Bedoya, Eds.). Universidad de Santiago de Compostela. Santiago de Compostela, 615-628.
- Nadal-Romero, E., Regüés, D., Martí-Bono, C. & Serrano-Muela, P. (2007). Badland dynamics in the Central Pyrenees: temporal and spatial patterns of weathering processes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32 (6), 888-904. doi: 10.1002/esp-1458.
- Nadal-Romero, E., Latron, J., Martí-Bono, C. & Regüés, D. (2008a). Temporal distribution of suspended sediment transport in a humid Mediterranean badland area: The Araguás catchment, Central Pyrenees. *Geomorphology*, 97, 601-616. doi:10.1016/j.geomorph.2007.09.009.
- Nadal-Romero, E., Regüés, D. & Latron, J. (2008b). Relationships among rainfall, runoff and suspended sediment in a small catchment with badland areas. *Catena*, 74: 139-150. doi: 10.1016/j.catena.2008.03.014.
- Nadal-Romero, E. & Regüés, D. (2009). Detachment and infiltration variations as consequence of regolith development in a Pyrenean Badland system. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 824-838. doi: 10.1002/esp.1772.
- Oades, J.M. (1988). The retention of organic matter in soils. *Biogeochemistry*, 5, 35-70.
- Oades, J.M. (1993). The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma*, 56 (1-4), 377-400. doi: 10.106/0016-7061(93)90123-3.
- Phillips, C.P. & Robinson, D.A. (1998). The impact of land use on the erodibility of dispersive clay soils in central and southern Italy. *Soil Use and Management*, 14 (3), 155-161. doi: 10.1111/j.1475-2743.1998.tb00143.x.
- Regüés, D. (1995). Meteorización física en relación con los procesos de producción y transporte de sedimentos en un área acarcavada. Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona, 302 pp.
- Regüés, D., Balasch, J.C., Castellort, X., Soler M. & Gallart F. (2000). Relación entre las tendencias temporales de producción y transporte de sedimentos y las condiciones climáticas en una pequeña cuenca de montaña mediterránea (Vallcebre, Pirineos orientales). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 26, 41-65.
- Regüés, D. & Torri, D. (2002). Efecto de la energía cinética de la lluvia sobre la dinámica de las propiedades físicas y el encostramiento en un suelo arcilloso sin vegetación. *Cuaternario y Geomorfología*, 16 (1-4), 57-71.
- Regüés, D. & Gallart, F. (2004). Seasonal patterns of runoff and erosion responses to simulated rainfall in a badland area in Mediterranean mountain conditions (Vallcebre, southeastern Pyrenees). *Earth Surface Processes and Landforms*, 29 (6), 755-767. doi: 10.1002/esp.1067.
- Salvador Sanchís, M.P., Torri, D., Borselli, L. & Poesen, J. (2008). Climate effects on soil erodibility. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33 (7), 1082-1097. doi: 10.1002/esp-1604.
- Sanroque, P., Rubio, J.L. & Izquierdo, L. (1990). Relationship among erodibility, parent material and soil type in areas of the Valencia Province Spain. *Soil Technology*, 3 (4), 373-384. doi: 10.1016/0933-3630(90)90018-X.
- Skinner, S.I.M., Halstead, R.L. & Brydon, J.E. (1959). Quantitative manometric determination of calcite and dolomite in soils and limestones. *Can. J. Soil Sci.*, 39, 197-204.
- Smith, R.M. & Cernuda, C.F. (1951). Some applications of the water-drop stability Testing to tropical soils of Puerto Rico. *Soil Science*, 71, 337-345.
- Sparling, G.P., Shepherd, G. & Kettles, H.A. (1992). Changes in soil organic carbon, microbial carbon and aggregate stability under continuous maize and cereal cropping, and after restoration to pasture in soils from the Manawatu Region, New Zealand. *Soil and Tillage Research*, 24, 225-241. doi: 10.1016/0167-1987(92)90089-T.
- Ternán, J.L., Williams, A.G. & González del Tanago, M. (1994). Soil properties and gully erosion in the Guadalajara province, Central Spain. En: *Conserving Our Soils Resources*, (Rickson Eds.). Cambridge, CAB International, 56-67.
- Tisdall, J.M. & Oades, J.M. (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33 (2), 141-163.
- Wischmeier, H. & Smith, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. *Agriculture Handbook*, 537. USDA, Science and Education Administration. Washington D.C., 85 pp.