

EL CLIMA Y EL HOMBRE COMO FACTORES DE LA ESTABILIDAD ESTRUCTURAL DEL SUELO. UN ESTUDIO A LO LARGO DE GRADIENTES CLIMÁTICO-ALTITUDINALES

A. CERDÀ

Departament de Geografia. Universitat de València. Apdo. 22060, 46080 València.
Centro de Investigaciones sobre Desertificación-CIDE (CSIC-Universitat de València-
Generalitat Valenciana). Camí de la Marjal, s/n, 46470 Albal, València

Resumen. El clima determina la vegetación, los procesos geomorfológicos e hidrológicos, y las características de los suelos, especialmente su estructura. Esta última, y en concreto la estabilidad de los agregados, ha sido utilizada como indicador del grado de degradación de los ecosistemas y de la erodibilidad de los suelos.

En este trabajo se investiga la influencia del clima sobre los procesos geomorfológicos a través de la estabilidad de los agregados. Para ello se han seleccionado suelos desarrollados bajo distintas condiciones climáticas a lo largo de gradientes climáticos-altitudinales en el sudeste de la Península Ibérica (Noroeste de la Cordillera Bética, Alacant) y en el sur de Bolivia (vertiente oeste de la Cordillera de los Andes, Tarija). En los dos casos el estudio se realizó sobre un transecto con vegetación natural o climática y otro sobre suelos antropizados: cultivos en Bolivia y degradados por incendios forestales, talas y reforestaciones en Alacant.

Los resultados demuestran que en los transectos naturales el clima influye decisivamente sobre la calidad de la agregación: los suelos desarrollados bajo climas húmedos son más estables que los desarrollados bajo climas áridos. En cambio, en los suelos degradados por la acción antrópica bien se pueden encontrar a lo largo de los gradientes climáticos relaciones semejantes a las vistas en los suelos naturales (cultivos en Bolivia), o bien una respuesta muy compleja debido a los distintos usos del suelo a lo largo del gradiente (transecto antropizado, Alacant). En general, la acción antrópica determina una fuerte reducción de la estabilidad de los agregados en ambientes semiáridos. En el extremo NW de la Cordillera Bética, y la zona oriental de los Andes, al sur de Bolivia, la acción antrópica puede dar lugar a la degradación de los ecosistemas naturales al alterar la agregación de los suelos. Los agregados son más estables en húmedo que en seco.

Palabras clave: Estabilidad de agregados, Clima, Geomorfología, Uso del suelo

Abstract. Climate determines the vegetation cover, the hydrological and erosional processes and the soil characteristics, especially his structure. The former, and concretely the aggregate stability has been used as indicator of the degree of ecosystem degradation and the soil erodibility.

In the present study the influence of climate on the geomorphologic processes is studied by means of the aggregate stability measurements. Soils developed under different climatic conditions have been selected along climatological-

4 Cerdà

altitudinal gradients in the south-east of the Iberian Peninsula (NW of the Betic Range, Alacant) and the south of Bolivia (Andean Range, Tarija). On both sites, the study was carried out on natural (climax vegetation) and anthropic transects, where cultivated soils in Bolivia and soils degraded by forest fire, clear-cutting and afforestation in Alacant were selected.

The results demonstrate that in the natural transect the climate determine the quality of the soil aggregates: the soils developed under wet climates are more stables than the soils developed under arid climates. However, the soils degraded by the human use shows a similar relationship (cultivated fields in Bolivia), or a very complex behaviour due to the different land uses along the transect (anthropic transect, Alacant). As a general conclusion, the human use determines a strong reduction of the aggregates stability in semiarid environments. On the NW of the Betic range and the eastern part of the Andean Range, in the south of Bolivia, the human use results in the degradation of the natural ecosystems due to the reduction of the aggregate stability. Aggregates are more stable under wet than dry conditions.

Key words: Aggregate stability, Geomorphology, Factors, Land Use

1. Introducción

En este trabajo se presentan los resultados de distintos estudios llevados a cabo durante los últimos siete años sobre la estabilidad de los agregados de los suelos desarrollados bajo distintos climas. Todas estas investigaciones tenían como objetivo el estudio de la degradación ambiental y sus efectos sobre los procesos geomorfológicos. La estabilidad de los agregados se ha utilizado como un parámetro ecológico que identifica la alteración de los ecosistemas, y la actividad de los procesos erosivos desde los año 40 (Imeson, 1984).

La estructura del suelo, y con ello 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. Por ello, la estabilidad de los agregados es un indicador de los procesos geomorfológicos que actúan en un territorio, y su interrelación con otras características de los suelos (biota, roquedo, usos del suelo, etc.) permite conocer el grado de degradación del ecosistema.

Las relaciones entre el clima y los procesos ecológicos son básicos para entender la dinámica geomorfológica actual y relictas (Derbyshire, 1976). Tales relaciones son de especial interés para los geomorfólogos, pero también para otras ramas de las ciencias de la Tierra. A pesar de ello, la información disponible para validar la influencia del clima (o cambio climático) sobre los procesos geomórficos es limitada. Una forma de identificar la influencia del clima sobre los procesos geomorfológicos es la medición de estos a lo largo de gradientes latitudinales, donde se produzcan cambios importantes en las condiciones climáticas. Otro, es realizar la misma operación pero sobre un gradiente altitudinal, donde al subir se produce una reducción de las temperaturas y un aumento de las precipitaciones. Esto último es más factible ya que estos cambios se producen en un territorio más reducido y permite la simultaneidad de los muestreos y las mediciones bajo distintas condiciones climáticas.

A continuación se presentan datos de cuatro transectos climático-altitudinales seleccionados. Los dos primeros se encuentran en la vertiente este de los Andes (Bolivia, Tarija) donde el muestreo se realizó en campos de cultivo (*AA*, Andes antropizado) y en suelos naturales (*AN*, Andes naturales). Los dos transectos restantes se localizaron en el extremo noroccidental de las Béticas, al norte de la provincia de Alacant. Allí se seleccionó un gradiente en un zona afectada por un intenso uso antrópico entre la Sierra de Aitana y Finestrat (*BA*, Béticas antropizado); y otro paralelo al anterior, en el que se tomaron muestras allí donde la actividad antrópica era reducida y donde predominaba la vegetación autóctona, entre el Port dels Tudons y Vilajoisa (*BN*, Béticas natural).

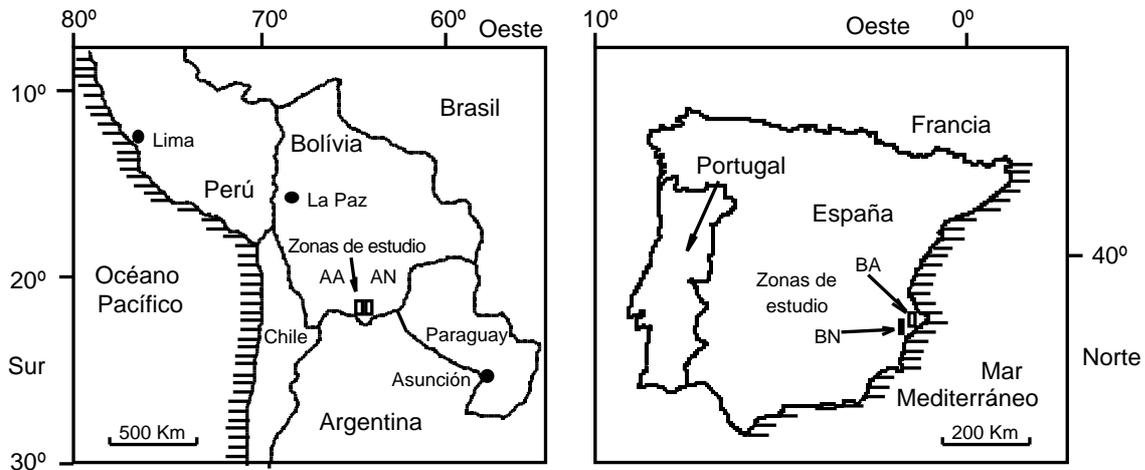


Figura 1. Localización de las zonas de estudio. Gradientes climáticos seleccionados en el sur de Bolivia: AN, Andes Natural y AA, Andes Antropizado; y en Alacant, BN, Béticas Natural y BA, Béticas Antropizado
 Location of the study zones. Climatological gradients selected in the south of Bolivia: AN, Andes Natural and AA, Andes Anthropic; and in Alacant: BN, Betic Natural and BA, Betic Anthropic

2. Métodos

2.1. Zonas de estudio

Las dos zonas de estudio (sur de Bolivia y sudeste de la Península Ibérica) y los cuatro transectos se seleccionaron en zonas montañosas (Cordillera de los Andes y Cordillera Bética) en las que los cambios en altitud producen una modificación importante en las condiciones climáticas (Figuras 1 y 2).

En el caso de Alacant, el primer transecto (BN) discurre entre Vilajoiosa (200 m.s.n.m.) y el Port dels Tudons (1200 m.s.n.m.). Las tres zonas de estudio se seleccionaron en ambientes muy poco alterado por el hombre, sobre calizas, en vertientes de orientación sur y en la parte media de la ladera para evitar el efecto de la acumulación coluvial de la base:

- *Vilajoiosa*: la precipitación en esta zona es de 300 mm año⁻¹ (Pérez, 1994), e incluso un poco más al sur las condiciones de aridez aún son más drásticas (San Joan, 226 mm año⁻¹). La vegetación es esté-

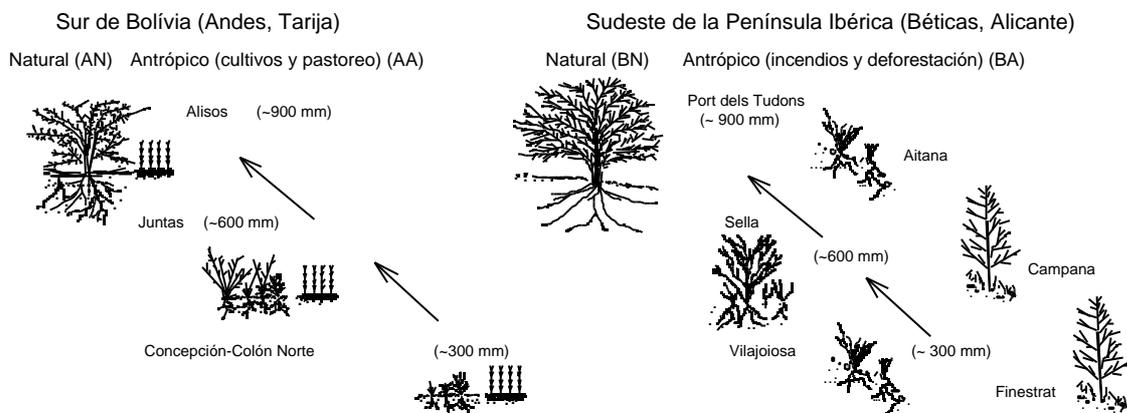


Figura 2. Localización de las zonas de estudio a lo largo de los gradientes climático-altitudinales
 Location of the study zones along climatological-altitudinal gradients

6 Cerdà

pica, la cubierta vegetal es del 30 % y se distribuye en macollas muy densas de *Stipa tenacissima* y arbustos de bajo porte como *Fumana ericoides*, *Thymus vulgaris*, *Rosmarinus officinalis*, etc. La zona se encuentra en la Serra d'Orxeta, y los suelos presentan profundidades entre 5 y 15 cm y son muy pobres en materia orgánica (1-3 %).

- *Sella*: la precipitación media anual es de unos 600 mm (Pérez, 1994), la cubierta vegetal es mucho más densa (60 %) y la composición florística corresponde a una maquia mediterránea con *Quercus coccifera* y *Pistacea lentiscus* como especies predominantes. La zona se encuentra al norte de Sella, en las estribaciones sur de la Serra d'Aitana a 650 m.s.n.m., y los suelos presentan profundidades entre 10 y 30 cm y niveles de materia orgánica entre 3 y 6 %.
- *Port del Tundons*: la precipitación alcanza en esta zona los 900 mm año⁻¹ (Pérez, 1994) ya que a cotas inferiores se superan los 700-800 mm como es el caso del observatorio de Alcoletja. La cubierta vegetal supera el 90 % y esta compuesta por un bosque de *Quercus ilex*. Este reducto de la vegetación potencial se encuentra a 1 km del Port dels Tudons, y los suelos presentan profundidades entre 15 y 60 cm y la materia orgánica es siempre superior al 5 %.

El segundo transecto de las Cordilleras Béticas (BA) corre paralelo al anterior, si bien mucho más cerca de la costa. Las zonas se seleccionaron allí donde la actividad antrópica ha sido muy intensa y donde son más evidentes los incendios repetitivos sufridos durante la década de los 80 y 90, el pastoreo, las repoblaciones, etc. cosa habitual en toda la cuenca mediterránea.

Las zonas seleccionadas en este transecto han sido:

- *Finestrat*: con una precipitación de unos 300 mm año⁻¹ presenta una cubierta de *Pinus halepensis* en la que destaca el sotobosque de *Ulex parviflorus* y *Rosmarinus officinalis*; y una cubierta vegetal del 70 %. La zona se encuentra a 150 m.s.n.m., entre Finestrat y Benidorm en la Serra de Cortina, y los suelos presentan profundidades entre 3 y 8 cm, con niveles de materia orgánica entre 1 y 2,5 %.
- *Campana*: con una precipitación de unos 600 mm año⁻¹ es la zona intermedia del transecto, donde la vegetación está especialmente degradada por los cultivos y otros usos antrópicos. Además de la cubierta de *Pinus halepensis*, destacan especies arbustivas como *Anthyllis cystisoides* y *Rosmarinus officinalis*, con una cubierta vegetal que alcanza el 80 %. La zona se encuentra a 550 m.s.n.m., al noroeste de Finestrat en la montaña del Puig Campana. Los suelos presentan profundidades entre 5 y 22 cm y los niveles de materia orgánica entre 2 y 7 %.
- *Aitana*: con unos 900 mm de precipitación media anual (Pérez, 1994) la vegetación potencial fue esquilada por el carboneo, incendios forestales repetidos, pastoreo, cultivo en el fondo de los valles, etc. Actualmente la composición florística está dominada por *Ulex parviflorus*, *Rosmarinus officinalis* y algunas matas de *Quercus coccifera* y la cubierta vegetal es de un 60 %. La zona se encuentra en la estribación oeste de la Serra d'Aitana, a una altura de 1100 m.s.n.m., y los suelos presentan profundidades entre 5 y 45 cm y con niveles de materia orgánica entre 3 y 10 %.

La existencia de un gradiente climático no sólo se confirma por la dispar precipitación media anual en cada una de las zonas, además, la temperatura media anual varía entre unos 18 °C en las zonas más baja y los 13 °C en la más altas. Las heladas son anecdóticas en las partes bajas de los transectos, mientras que en la zona montañosa se registran más de 50 días al año.

Las series de vegetación que corresponden a cada zona de estudio son *Chamaeropo-Rhamnetum lycioides*, *Quercus cocciferae-Pistacietum lentisci* y *Rubio longifoliae-Quercetum* respectivamente para las tres zonas de estudios localizadas a distintas alturas (Costa, 1986). En general, la vegetación actual está muy influenciada por el uso antrópico del medio. Los incendios forestales recientes han reducido la cubierta vegetal y alterado la composición florística de la zona denominada Aitana, mientras que en Campana y Finestrat la predominante cubierta de pinar no es la vegetación potencial y está relacionada con la masificación de esta especie en la Península Ibérica. Un caso similar se ha descrito en un transecto paralelo sobre margas (Cerdà et al., 1996).

En el caso de Bolivia se seleccionaron tres zonas de estudio en la vertiente este de los Andes, las cuales corresponden a tres umbrales distintos de precipitación y a otros tantos ecosistemas. En cada zona se seleccionaron suelos bajo cultivo (AA), en todos los casos se seleccionó el maíz como cultivo más representativo, y suelos naturales (AN), donde la vegetación potencial era la dominante. La zonas de estudio se

encuentran a lo largo de la cuenca del río Camacho, la cual presenta un fuerte gradiente altitudinal, ya que oscila entre los 4200 y los 1669 m.s.n.m., con un 4.1 % de pendiente media (Martínez, 1985). El muestreo se realizó siempre sobre suelos aluviales localizados en el fondo del valle, en las siguientes zonas:

- *Alisos*: con una precipitación media anual de unos 900 mm —869 mm en la ciudad de Alisos— (Liebermann, 1993) la vegetación está compuesta por los bosques montañosos subalpinos (*Alnus acuminata* ssp. *acuminata*), pino de cerro (*Podocarpus parlatorei*) y las selvas de transición con *Tipuana tipu*, etc. La cubierta vegetal es muy densa (95 %) y los suelos presentan niveles de materia orgánica muy elevados (10-12 %) que se reduce en los suelos cultivados (5-6 %).
- *Juntas*: con una precipitación de unos 600 mm año⁻¹ —679 mm en la ciudad de Juntas— es la zona intermedia del transecto. Allí, la vegetación, tras la degradación de los bosques típicos del Dominio Chaqueño Montano está dominado por *Acacia caven*, *Geffroea decorticans* y *Prosopis laevigata* var. *andicola* (Liebermann, 1993). La cubierta vegetal en la zona natural es de un 75 % y los suelos son relativamente ricos en materia orgánica (4-8 %), aunque en el suelo cultivado no supera el 3 %.
- *Concepción-Colón Norte*: con una precipitación de unos 300 mm año⁻¹ (320 mm en el observatorio de La Angostura) presenta una cubierta de matorral (*Baccharis* spp.) muy poco denso (20 %). El contenido de materia orgánica de estos suelos es de 3-4 % mientras que cuando han sido cultivados desciende a valores inferiores a 1,5 %.

Por lo tanto se dispone de cuatro transectos. Dos en la Cordillera Bética, uno con condiciones naturales y vegetación climácica (*BN*), y otro antropizado (*BA*) con vegetación muy degradada. Y dos en los Andes, uno bajo condiciones naturales (*AN*) y otro sobre suelos cultivados (*AA*).

2.2. Muestreo y test de laboratorio

El muestreo consistió en la descripción de los suelos según las guías de campo de FAO-UNESCO (1988) y la selección por tamizado manual de agregados entre 4 y 4,8 mm, eliminándose la pedregosidad. Se tomaron muestras del horizonte superficial (0-5 cm) ya que desde el punto de vista de los procesos erosivos los primeros centímetros del suelo son los más significativos.

Se aplicaron cuatro test a todas las muestras. El *test de Emerson* consiste en anotar el estado del agregado sumergido en agua destilada a distintos intervalos de tiempo (Emerson, 1967). En el test modificado (MEWDT, *Modified Emerson Water Dispersion Test*) utilizado en este trabajo se realiza la evaluación del estado del agregado inmediatamente después de sumergirlo y a los 5 minutos, 2 horas y 24 horas (Cerdà, 1994). Otras dos pruebas de laboratorio realizadas son el test por goteo y por ultrasonidos. El procedimiento para estos últimos ha sido el siguiente:

- Estabilidad ante *impactos de gotas* (Imeson y Vis, 1984):
 - a) Test *CND* (*Counting the Number of Drop-impacts*). Se contabiliza el número de impactos de gotas (de 1 g y desde una altura de 1 m) necesarias para la rotura o dispersión de un agregado (contabilizadas hasta 200 impactos). Este experimento se repite al menos veinte veces, lo que permite caracterizar cada muestra con una curva de estabilidad para distintos niveles de energía. El test se repite para agregados secos y húmedos (pF1), con el fin de conocer su comportamiento en ambos estados, al inicio y durante la lluvia respectivamente. Con este test se pretende reproducir el proceso natural de destrucción de los agregados por los impactos de las gotas, y con el se evalúa la resistencia de los agregados ante lluvias de distinta intensidad y duración.
 - b) El test *TDI* (*Ten Drop Impacts*) consiste en someter a un agregado al impacto de 10 gotas, y contabilizar la proporción de la muestra dispersada-agregada.
- *Test por ultrasonidos* (*UD*, *Ultrasonic Dispersion*) (Cerdà, 1993b; 1994). Con él se mide la resistencia de los agregados ante la radiación por ultrasonidos (Edwards y Bremmer, 1967; Genrich y Bremmer, 1972; North, 1976). El método consiste en someter a 10 agregados, previamente humectados a pF1, a distintas intensidades de radiación (de 30 a 115 vatios). La prueba se realiza sumergiendo la sonda de los ultrasonidos a 10 mm de profundidad en una columna de agua de 40 mm de profundidad (40 ml de volumen), y en la que los agregados se encuentran en el fondo del recipiente. Posteriormente se contabilizan los agregados no dispersados y la proporción de la muestra dispersada-agregada.

3. Resultados

3.1. Dispersión en agua (MWEDT, Modified Water Emerson dispersion Test)

La media de los 10 agregados seleccionados en cada muestra indican que en los dos transectos de Bolivia decrece la estabilidad de los agregados con el aumento de la precipitación (Figura 3). Hay que resaltar que en el transecto natural las dos zonas más húmedas, Alisos y Juntas, presentan suelos menos dispersables que la árida de Concepción-Colón Norte, y que en general los suelos del transecto cultivado con maíz son mucho más dispersables que los naturales. Dentro de cada zona, las diferencias debidas al cultivo oscilan entre 1,8 y 2,7 puntos del índice de dispersión en Concepción-Colón Norte y Alisos respectivamente.

Los transecto seleccionados en Alacant muestran por una parte la mayor dispersabilidad de los suelos de las zonas antropizadas y por la relación negativa entre la precipitación media anual y el grado de dispersabilidad de los agregados en los suelos naturales. En el transecto antropizado, no existe ninguna relación entre la precipitación media anual y el índice de dispersabilidad. Hay que destacar las grandes diferencias encontradas entre el transecto natural y antropizado, especialmente en aquella zona más húmeda (Aitana-Port dels Tudons, 900 mm año⁻¹) se debe a la drástica degradación del medio al eliminarse la cubierta vegetal climácica.

4.2. Test CND (Counting the Number of Drop-impacts)

Los resultados del test CND se presentan en las figuras 4 y 5 para cada zona de estudio y para el horizonte superficial. El test se realizó en seco y húmedo (pF1) con el fin de conocer la respuesta del suelo ante distintos contenidos de agua.

Para el transecto natural de Alacant se comprueba la elevada estabilidad de los suelos cuando no sufre alteraciones antrópicas. Concretamente, más del 50 % de los agregados resisten más de 200 impactos de gota en cualquier zona y bajo cualquier estado de humedad. Además, la estabilidad de los agregados es mayor en las zonas con mayores precipitaciones anuales, tanto en seco como en húmedo (pF1), y su estabilidad aumenta cuando el test se realiza con agregados húmedos (Figura 4).

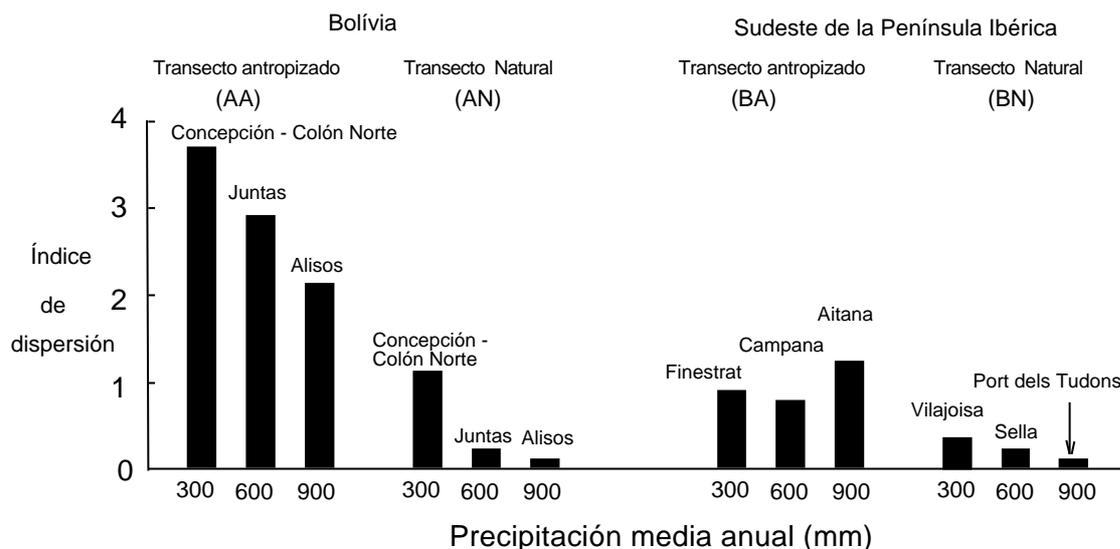


Figura 3. Test MEWDT (Modified Emerson Water Dispersion Test) en los dos transectos climáticos-altitudinales seleccionados en los Andes (Tarija, Bolivia) y las Béticas (Alacant, España), después de 24 horas de inmersión de los agregados
Test MEWDT (Modified Emerson Water Dispersion Test) in the two climatological-altitudinal gradients selected in the Andes (Tarija, Bolivia) and in the Betic mountains (Alacant, Spain), after 24 hours of aggregate immersion

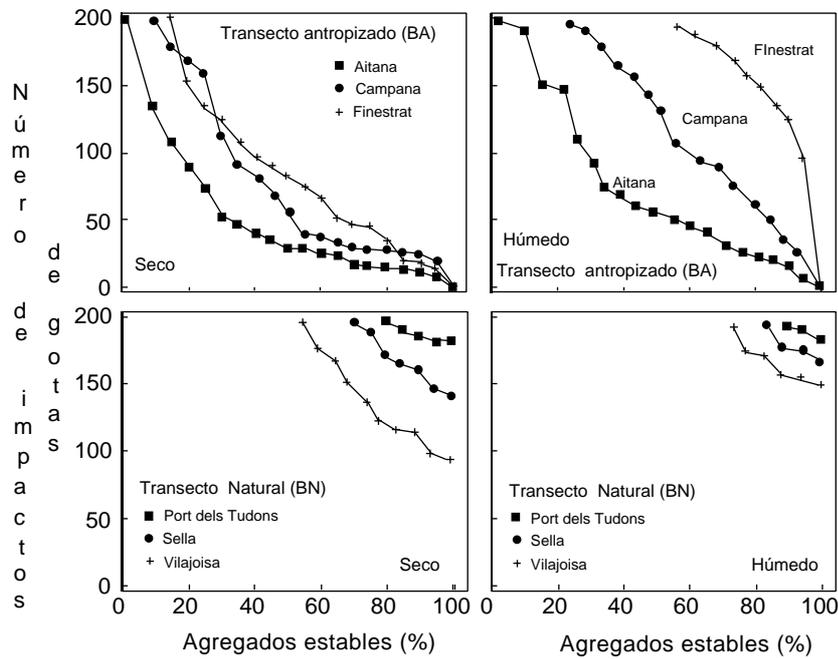


Figura 4. Test CND (Número de impactos de gotas) en los dos transectos climáticos-altitudinales seleccionados en el norte de la Cordillera Bética, Alacant, en seco y húmedo (pF1)
 Test CND (Number of drop-impacts) in the climatological-altitudinal gradient selected in the north of the Betic mountains, Alacant, Spain, under dry and wet (pF1) conditions

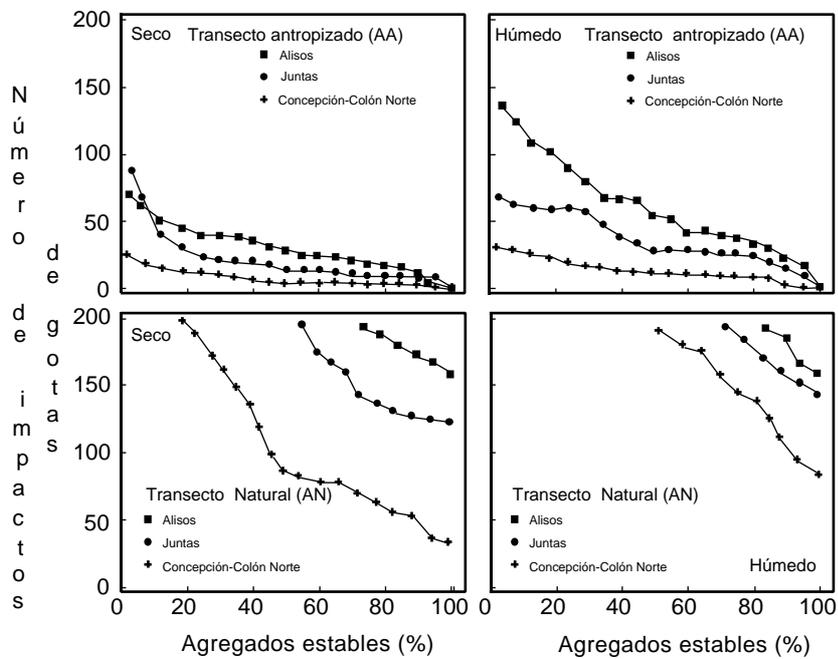


Figura 5. Test CND (Número de impactos de gotas) en los dos transectos climáticos-altitudinales seleccionados en la vertiente oeste de los Andes, Bolivia, en seco y húmedo (pF1)
 Test CND (Number of drop-impacts) in the climatological-altitudinal gradient selected in the eastern slope of the Andean range, Bolivia, under dry and wet (pF1) conditions

10 Cerdà

En el transecto antropizado de Alacant bien no existen diferencias claras a lo largo del gradiente, bien estas diferencias muestran una relación negativa entre la precipitación media anual y la estabilidad de los agregados. En comparación con el transecto natural la estabilidad de los agregados sufre una reducción drástica (Figura 4). En seco, un 80 % de la muestra en Aitana, un 70 % en Campana y un 65 % en Finestrat no superan 100 impactos de gota, lo que es indicativo de la baja estabilidad de los agregados en comparación con los suelos naturales.

En el caso de Bolivia, se ha encontrado una muy baja estabilidad de los agregados en los suelos cultivados. En seco ningún agregado resiste más de 100 impactos de gotas, y tanto en húmedo como en seco el 50 % de la muestra se dispersa después de 50 impactos de gota. A pesar de esto, se puede distinguir que en el transecto antropizado, y mucho más claramente en el natural, hay un aumento de la estabilidad de los agregados cuanto más húmeda es la zona. Siempre se ha encontrado que los agregados son más estables cuando están húmedos que cuando están secos (Figura 5).

4.3. Test TDI (Ten Drop-impacts)

El test TDI informa del comportamiento de los suelos ante chaparrones de reducida magnitud y alta frecuencia debido al reducido número de gotas que se precipitan sobre el agregado (10). De la muestra superviviente en forma de agregado o bien de la inestable (aquí presentado en %) se deduce el grado de estabilidad o inestabilidad de los agregados y del suelo.

Este test confirma la elevada estabilidad de los suelos situados en los transectos naturales, y dentro de ellos la mayor estabilidad de las zonas húmedas. La estabilidad aumenta ligeramente (entre un 5-10 %) cuando el agregado está húmedo (Figura 6). Las zonas húmedas (900 mm año^{-1}) son extremadamente estables como lo demuestra el que después de 10 impactos de gotas de 1 gramo más del 85 % de la muestra se mantiene estable, e incluso en los experimentos realizados en húmedo (pF1) se supera el 95 %.

Por el contrario, en los transectos antropizados el porcentaje de muestra estable después de 10 impactos de gota es mucho menor. En el caso de Bolivia en ningún caso se supera el 20 % de muestra estable y en la zona más árida, Concepción-Colón Norte, no se alcanza el 10 % de muestra estable. Apesar de esta drástica reducción de la estabilidad de los agregados, se mantiene la tendencia encontrada en el transecto natural: son más estables los agregados de las zonas más húmedas. En Alisos y Juntas, con 600 y 900 mm de precipitación media anual respectivamente, son más estables los suelos cuando están húmedos, en cambio en la zona árida, Concepción-Colón Norte, los suelos son más estables en seco (9 % de muestra estable) que en húmedo (6 %).

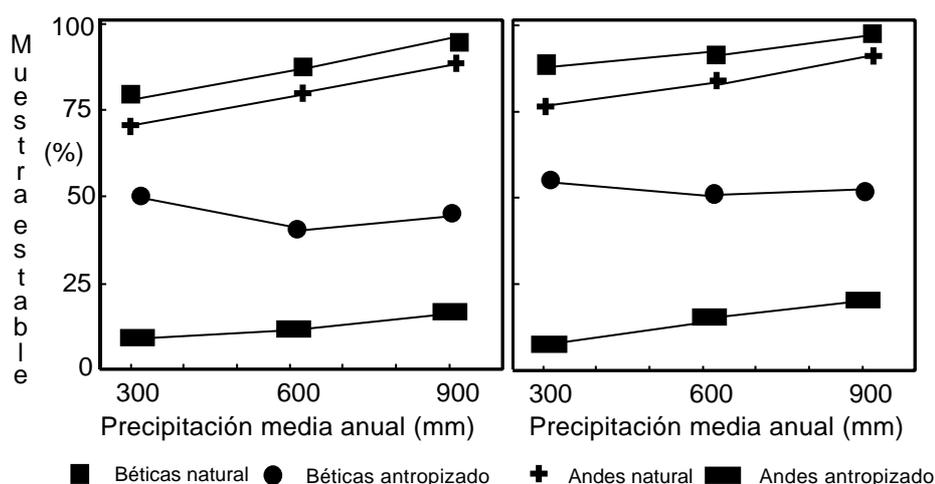


Figura 6. Test TDI. Porcentaje de muestra estable después de 10 impactos de gotas en los suelos de los transectos antropizados y naturales seleccionados en el sur de Bolivia y el sudeste de España
Test TDI. Percentage of stable sample after 10 drop-impacts in the soils of the anthropic and natural gradients selected in the south of Bolivia and the southeast of Spain

En el transecto antropizado de las Béticas el porcentaje de muestra estable oscila entre 40 y 55 %, y no existe ninguna tendencia clara a lo largo del gradiente. Si es evidente un aumento de la estabilidad del suelo, entre un 3 y un 9 %, cuando el experimento se realiza en húmedo.

4.4. Test UD (Ultrasonic Dispersion)

El test por ultrasonidos también se aplicó a todas las muestras, pero siempre sobre agregados humedecidos previamente a pF1. Este test confirma las tendencias vistas anteriormente. Los suelos naturales son más estables cuanto más húmedo es el clima sobre el que se desarrollan. Esto se confirma tanto para el transecto natural como para Alacant. En Bolivia, suelos cultivados, se mantiene la influencia del clima sobre la agregación, es decir son más estables los suelos en las zonas húmedas, pero hay una reducción drástica de la estabilidad de los agregados respecto a los suelos naturales. En Alacant esta reducción es menos importante pero evidente. Por el contrario no se mantiene la influencia del clima, como lo demuestra el que Finestrat, la zona más árida, presenta suelos ligeramente más estables que Aitana, la zona más húmeda.

5. Discusión

El uso de cuatro test (por dispersión en agua, ultrasonidos, y impactos de gotas) y su repetición en seco y en húmedo permite conocer la influencia de algunos factores (agua en el suelo, usos del suelo y clima) sobre la estabilidad de los agregados.

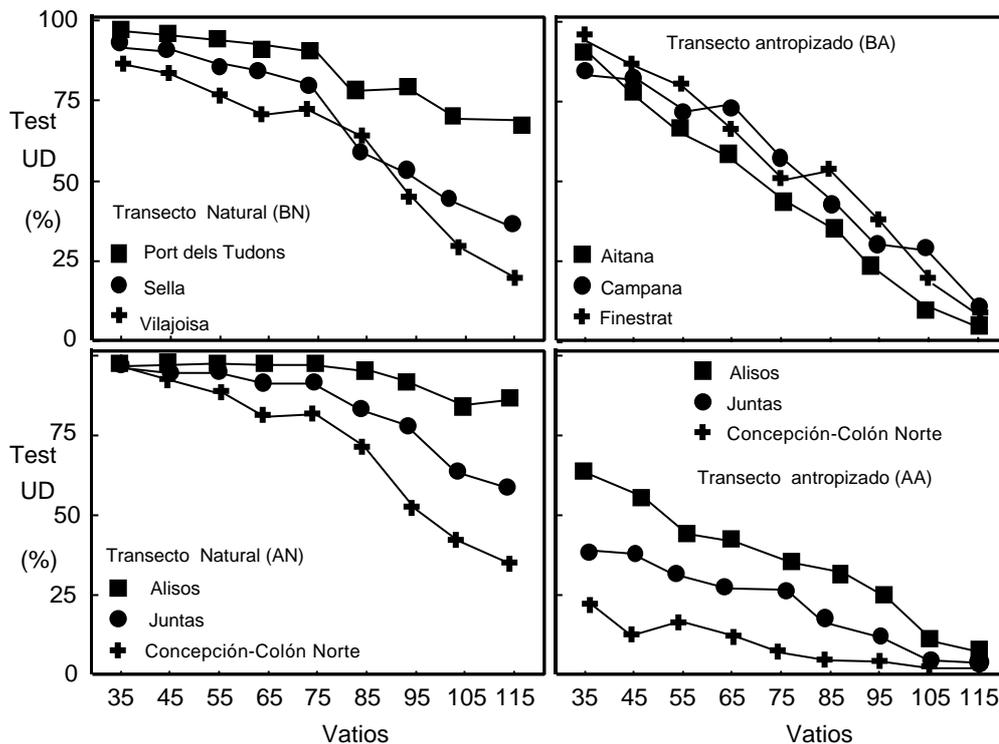


Figura 7. Test UD. Porcentaje de muestra estable después de la aplicación durante 10 segundos de una determinada energía (de 35 a 115 vatios) por medio de la sonda de ultrasonidos. Suelos de los transectos antropizados y naturales seleccionados en el sur de Bolivia y el sudeste de España

Test UD. Percentage of the stable sample after the application during 10 seconds of different levels of energy (from 35 to 115 watts) by means of the ultrasonic probe. Soils from the anthropic and natural gradients selected in the south of Bolivia and the southeast of Spain

12 Cerdà

5.1. La influencia de la humedad del suelo en el proceso de dispersión de los agregados

Con excepción del suelo muy inestable de Concepción-Colón Norte (300 mm año^{-1}), en todo los casos los agregados son más estables en húmedo que en seco. Esto es debido a que tanto en el test TDI y CND (no en los test UD y MEWDT en los que la medición se realiza con los agregados inmersos en agua) el proceso de rotura del agregado en seco se produce por la compresión del aire entrampado en los poros por el frente de humedad que penetra en el agregado. La presión termina por hacer “explotar” el agregado al salir rápidamente el aire entrampado en el centro del agregado. 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 mínimo.

La reducida porosidad de los agregados procedentes de los suelos muy degradados, como es el caso de Concepción-Colón Norte, impide que el proceso comentado anteriormente se produzca, por lo que estos suelos incluso pueden ser más estables en seco que en húmedo. Un comportamiento similar se ha encontrado en suelos muy degradados con son los de los badlands, donde en los suelos húmedos el proceso de dispersión de las arcillas favorece una muy rápida disgregación de los agregados húmedos (Gerits, 1989; Cerdà, 1996).

5.2. Usos del suelo y degradación estructural de los suelos

Las doce zonas de estudio seleccionadas corresponden a cuatro tipos de usos del suelo, lo cual determina la calidad de la estructura y su resistencia ante impactos de gota, o cualquier otra forma de energía.

Los suelos de las seis zonas de los dos transectos naturales siempre presentan los agregados más estables. En cambio, la zona del transecto antropizado de Alacant, afectadas por usos del suelo que favorecen los incendios forestales, el pastoreo, repoblaciones, etc. muestran siempre -en las tres zonas y en todos los test aplicados- que los agregados son menos estables que en las zonas naturales. Los suelos cultivados en el transecto antropizado de Bolivia presentan incluso agregados más inestables que los de Alacant, lo que es debido al cultivo.

Se puede concluir que el uso antrópico del medio da como resultado un aumento de la degradación de la estructura del suelo. Sin duda el cultivo supone la alteración más drástica de la estructura del suelo al hacerse efectiva la modificación mecánica (laboreo) y química (alteración de los ciclos de los principales nutrientes) del suelo.

Estos resultados confirman a escala de agregados (milimétrica) la degradación ambiental producida por los distintos usos del suelo, y confirma trabajos de otros autores (Harris et al., 1966; Goudie, 1981). El cultivo siempre ha sido visto como un factor negativo de la calidad de la agregación de los suelos (Cerdà et al., 1994; 1995), lo que confirma la baja estabilidad de los agregados en el transecto cultivado en Bolivia. También el pastoreo, las repoblaciones, e incluso el uso lúdico de los espacios naturales dan lugar a la degradación estructural de los suelos. Últimamente se ha hecho especial hincapié en los incendios forestales, los cuales provocan la degradación del suelo y la cubierta vegetal en general y de la estructura del suelo en particular (Úbeda et al., 1990; Cerdà, 1993).

5.5. El efecto del clima

En los suelos naturales siempre se ha encontrado un aumento de la estabilidad de los agregados desde las zonas más áridas a las más húmedas. Esto es debido a que la materia orgánica es mayor en estos últimos, lo que permite el mejor y más rápida formación de los agregados. Distintos autores han comprobado como es la materia orgánica el factor clave en la formación de los agregados (Oades, 1982; Oades, 1993; Tisdall y Zhang, 1994) y que su degradación favorece tasas de erosión mayores y menores tasas de infiltración.

Esta influencia del clima se mantiene en los suelos cultivados, ya que a pesar de que sus agregados son muchos menos estables que en las zonas naturales, hay un aumento de la estabilidad de los agregados desde la zona árida a la humedad. Esto es sin duda debido a que en las tres zonas de estudio hay una práctica similar de las labores de siembra, laboreo y recogida de la cosecha.

En la única zona en la que no se ha encontrado una clara relación entre el clima y la estabilidad de los agregados ha sido la del transecto antropizado de Alacant, en el cual el impacto antrópico es muy variable entre zonas de estudio. En concreto, en la zona más húmeda la elevada recurrencia de los incendios forestales ha dado lugar a la reciente degradación de los suelos, mientras que en las zonas intermedia y árida el incipiente desarrollo de un pinar ha favorecido la recuperación de los suelos. Respecto a esto, hay que destacar el efecto de la hojarasca del pino que transfiere características hidrofóbicas a la capa superficial del suelo y con ello favorece el desarrollo de un horizonte superficial más estable.

Otros trabajos realizados en varias zonas del Mediterráneo con una metodología semejante muestran que a lo largo de gradiente climáticos afectados por distintos usos del suelo son estos últimos los que determinan las diferencias de la calidad de la agregación, las tasas de escorrentía y los procesos erosivos entre zonas (Boix *et al.*, 1994; 1995a; 1995b; 1995c; 1995d; Soriano *et al.*, 1995a; 1995b; Cerdà *et al.*, 1996), aunque obviamente la influencia del clima subyace. En algunas zonas, con usos de suelo homogéneos a lo largo de los gradientes se ha comprobado que la influencia del clima es la determinante más importante de las diferencias entre zonas a lo largo de los gradientes climático-altitudinales (Lavee *et al.*, 1991; 1996).

6. Conclusiones

La estabilidad de los agregados de los suelos en ecosistemas naturales está determinada por las condiciones climáticas. Cuando la acción antrópica es homogénea (cultivo) la influencia del clima se mantiene a pesar de producirse una drástica reducción de la calidad de la agregación de los suelos. En zonas con usos antrópicos heterogéneos las diferencias entre zonas de estudio no son claras y no muestran un claro patrón a lo largo de los gradientes climáticos-altitudinales. Por lo tanto, la explotación del suelo provoca una reducción de la calidad de la agregación que dará lugar a la alteración de los procesos naturales. Además favorece una mayor variabilidad en el comportamiento de los suelos con lo que el paisaje se diversifica.

La estabilidad estructural de los suelos podría ser utilizada para la optimización de los usos potenciales del suelo y como indicador de la degradación inducida por la actividad antrópica.

Referencias bibliográficas

- Boix, C., Calvo, A., Cerdà, A., Imeson, A.C., Soriano, M.D. & Tiemessen, I.R.** (1995a): Vulnerability of Mediterranean ecosystems to climatic change, study of soil degradation under different climatological conditions in an altitudinal transect in the south east of Spain. En Zwerver, S., van Rompaey, R.S.A.R., Kok, M.T.J. and Berk, M.M. (Eds.): *Climate Change Research. Evaluation and Policy Implications*, 763-766.
- Boix, C., Calvo, A., Imeson, A.C. & Soriano, M.D.** (1995b): Climatic and altitudinal effects on soil aggregation in slopes of Mediterranean environment. *Physics and Chemistry of the Earth*, 20 (3-4) 287-292
- Boix, C., Calvo, A., Imeson, A.C., Schoorl, J.M., Soriano, M.D. & Tiemessen, I.R.** (1995d): Properties and erosional response of soils in a degraded ecosystem in Crete (Greece). *Environmental Monitoring and Assessment*, 37, 79-92.
- Boix, C., Calvo, A., Soriano, M.D. & Tiemessen, I.** (1994): Variabilidad espacio temporal de la agregación de suelos en laderas mediterráneas. En J. Arnáez, J.M. García Ruiz y A. Gómez Villar, (Eds.): *Geomorfología en España*, 289-302.
- Boix, C., Soriano, M.D., Calvo, A., Imeson, A.C., Schoorl, J.M. & Tiemessen, I.R.** (1995c): Estudio de la agregación de los suelos y su respuesta a la lluvia simulada en un gradiente altitudinal en Creta (Grecia). *Cuaternario y Geomorfología*, 9, 27-38.
- Cerdà, A.** (1993): Incendios forestales y estabilidad de agregados. *Cuadernos de Geografía*, 53, 1-16.
- 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 (1-2) 69-85.

14 Cerdà

- Cerdà, A.** (1995): Efectos del manejo sobre la estabilidad de los agregados del suelo en el Valle del Río Camacho, Sur de Bolivia. Informe del proyecto: *Estrategias de los agricultores y sistemas de producción agropecuaria en ambientes frágiles de áreas de montaña en Latinoamérica*, 60 p.
- Cerdà, A.** (1996): Soil aggregate stability in three mediterranean environments. *Soil Technology*, 80.
- Cerdà, A., García-Alvarez, A. Cammeraat, L.H. & Imeson, A.C.** (1994): Agregación del suelo en una catena afectada por el abandono del cultivo en la cuenca del Guadalentín (Murcia). I. Estabilidad y distribución de los agregados del suelo. En García Ruiz, J.M. y Lasanta, T. (Eds): *Consecuencias Geomorfológicas del abandono de tierras*, 9-19.
- Cerdà, A., García-Alvarez, A. Cammeraat, L.H. & Imeson, A.C.** (1995): Agregación del suelo en una catena afectada por el abandono del cultivo en la cuenca del Guadalentín (Murcia). II. Fluctuación estacional y dinámica microbiana. *Pirineos*, 145-146, 3-11.
- Costa, M.** (1986): *La vegetación en el País Valenciano*. Universitat de València. Servicio de Publicaciones.
- Derbyshire, E.** (1976): *Geomorphology and climate*. John Wiley and Sons, Bristol, 512 pp.
- Edwards, A.P. & Bremmer, J.M.** (1967): Microaggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 18, 64-73.
- Emerson, W.W.** (1967): A classification of soil aggregates based on their coherence in water. *Aust. J. Soil Res.*, 5, 47-57.
- F.A.O.-U.N.E.S.C.O.** (1988): *Soil Map of the World*. 1:5.000.000. I. Revised Legend. Roma.
- Genrich, D.A. & Bremmer, J.M.** (1972): Effect of probe condition on ultrasonic dispersion of soil by probe-type ultrasonic vibrations. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 36, 975-76.
- Gerits, J.J.P.** (1991): *Physico-chemical thresholds for sediment detachment, transport and deposition*. Universiteit van Amsterdam, Amsterdam, 186 pp.
- Goudie, A.** (1981): *The human impact on the nature environment*. Blackwell, Oxford, 388 pp.
- Harris, R.F., Chesters, G. & Allen, O.N.** (1966): Dynamics of soil aggregation. *Advances in Agronomy*, 18, 107-169.
- Imeson, A.C.** (1984): An eco-geomorphological approach to the soil degradation and erosion problem. En Fantechi, R. y Margaris, N.S. (Eds.): *Desertification in Europe*, D. Reidel publishing Co. Dordrecht, 110-125.
- Imeson, A.C. & Vis, M.** (1984): Assessing soil aggregate stability by water-drop impact and ultrasonic dispersion. *Geoderma*, 34, 185-200.
- Lavee, H., Imeson, A.C., Pariente, S. & Benyamini, Y.** (1991): The response of soils to simulated rainfall along a climatological gradient in an arid and semiarid region. *Catena Supplement*, 19, 19-37.
- Liberman, M.** (1993): *Informe de la vegetación y el uso de la tierra en Juntas, Tarija, Bolivia*. Documento de trabajo 93/03.
- Martínez, R.** (1985). *Estudio de control y protección de la cuenca del río Camacho*. Tesis inédita. Ing. Hidráulica, UMSA. La Paz.
- North, P.F.** (1976): Towards an absolute measurement of soil structural stability using ultrasound. *Journal of Soil Science*, 27, 451-9.
- Oades, J.M.** (1993): The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma*, 56, 377-400.
- Pérez, A. J.** (1994): *Atlas climático de la Comunidad Valenciana*. Generalitat Valenciana, València, 205 pp.
- Soriano, M.D., Calvo, A., Boix, C. Cerdà, A., & Imeson, A.C.** (1995a): Human impact in soils and land use in the degradation of Mediterranean ecosystems. *Proceedings of the International Conference on Erosion and Degradation in the Mediterranean*, 573-580.
- Soriano, M.D., Calvo, A., Boix, C., & Imeson, A.C.** (1995b): Effect of climate on some soil properties and related thresholds controlling the erosional response of soils in a limestone area. *Physics and Chemistry of the Earth*, 20 (3-4) 281-286.
- Tisdall, J.M. & Oades, J.M.** (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33, 141-163.
- Ubeda, X., Sala, M. & Imeson, A.** (1990): Variaciones en la estabilidad y consistencia de un suelo forestal antes y después de ser sometido a un incendio. 1ª *Reunión Nacional de Geomorfología*, Teruel, 677-685.
- Zhang, H.** (1994). Organic matter incorporation affects mechanical properties of soil aggregates. *Soil and Tillage Research*, 31, 263-275.