

METODOS PARA LA MEDICION DE LA ESTABILIDAD DE LOS AGREGADOS DEL SUELO

ARTEMI CERDÀ

Fysisch Geographisch Bodemkundig Laboratorium. Landscape and Environmental Research Group. Universiteit van Amsterdam. Nieuwe Prinsengracht, 130, 1018 VZ. AMSTERDAM, HOLANDA

Resumen. En suelos calcáreos similares se aplican dos métodos para la medición de la estabilidad de los agregados: por impacto de gotas (test CND y TDI) y mediante ultrasonidos (test UD). Los tres test proporcionan resultados diferentes para cada horizonte y cada suelo en función de la energía aplicada y de la estabilidad de los agregados. En suelos muy estables, como los estudiados en este trabajo, el test que proporciona mejores resultados es el CND.

La estabilidad de los agregados depende básicamente del contenido de agua previo y de la materia orgánica, mientras que las arcillas tienen una influencia secundaria. Esto produce una mayor estabilidad de los agregados en los horizontes superficiales, especialmente cuando están húmedos.

Cada test es aplicable a un determinado nivel de estabilidad, por lo que en cada tipo de suelo se debe seleccionar cuál de ellos utilizar. El método de dispersión por ultrasonidos es más versátil, ya que se puede utilizar distintos niveles de energía, pero con impactos de gota se reproduce más fielmente el proceso de dispersión y rotura de los agregados.

No se ha encontrado ninguna relación entre los resultados de los test y la descripción en el campo de la estructura y la consistencia de la agregación del suelo.

Palabras Clave: Agregados, Métodos, Suelos, Test, Gotas, Ultrasonidos.

Abstract. The CND and TDI test, both of them based on the water drop method, and the UD test, based on the ultrasonic disruption method, were applied to several soil horizons belonging to similar calcareous soils with the aim of assessing their water aggregate stability and the factors involved in it. The three tests provided differences between them and between horizons, according to the energy of disruption applied and the stability of the aggregate analysed.

In very stable soils, such as those used in this work, the CND test seems to provide the best results in order to assess the water stability of aggregates. In these soils the water aggregate stability seems to be more dependent on the initial water content of aggregates and on their organic matter content than on their clay content, as proved by the higher stability of wetted aggregates at pF1 of superficial horizons.

Each test measure different levels of stability, and as a consequence for each soil type it must be selected the more accurate one. The ultrasonic dispersion method is the most versatile, because different levels of energy can be used, but with the drop test the process of dispersion and breakdown of aggregates is imitated perfectly.

There were not relationships found between the results of laboratory test and the description of structure and consistency of soils in the field.

Key words: Aggregates, Methods, Soils, Test, Drops, Ultrasounds.

1. Introducción

La gran influencia de la agregación del suelo en los procesos hidrológicos y erosivos han hecho que se hayan desarrollado un gran número de métodos y test para la determinación de su estabilidad (Low, 1954; 1955; North, 1976; Farres, 1977; Hinds y Lowe, 1980; Bergsma y Valenzuela, 1981; Egashira *et al.*, 1983; Glanville y Smith, 1988).

En general, estos test intentan reproducir los procesos de destrucción de los agregados, bien por impacto de gotas, por la escorrentía o simplemente por el efecto de la humectación. El uso de impactos de gotas es el método más antiguo y seguramente el más famoso (McCalla, 1944), aunque también son importantes la simulación del proceso de arroyada con el tamiz húmedo y el efecto de la humectación (Emerson, 1959).

Un método más moderno, y con el que no se pretende reproducir ningún mecanismo natural de destrucción de los agregados es de dispersión por ultrasonidos (Edwards y Bremmer, 1967; Genrich y Bremmer, 1972a; 1972b). En este método se aplica un determinado nivel de energía (vatios) durante un periodo de tiempo concreto, con lo que se conoce el grado de estabilidad de las diferentes muestras. El estudio de la estabilidad de los agregados con ultrasonidos tiene la ventaja que se trata la muestra con niveles de energía en abstracto, pero tiene el inconveniente de no reproducir los mecanismos naturales de desagregación. Además, a su favor tiene que, si bien en todos los métodos existe la posibilidad de aumentar la intensidad o la duración de la energía aplicada sobre el agregado, con los ultrasonidos es mucho más factible.

Aunque desde otro punto de vista, la descripción del suelo en el campo también pretende una determinar la calidad de la agregación y la consistencia de ésta (FAO, 1977).

El objetivo de este trabajo es la evaluación y comparación de los dos métodos más utilizados en la actualidad en la determinación de la estabilidad de los agregados: dispersión por ultrasonidos (test UD) y por impacto de gotas (test TDI y CND), y su comparación con las descripciones realizadas en el campo.

2. Material, Métodos y Zonas de estudio

Los métodos utilizados para la medición de la estabilidad de los agregados han sido dos: ultrasonidos y impactos de gotas, aunque en cada uno de ellos los test a aplicar son múltiples. Aquí se presentan los test CND y TDI para el impacto de gotas (*drop-test*), y distintos niveles de energía (vatios) y duración de la aplicación (5 ó 10 segundos) para el test UD (*Ultrasonic Disruption*).

En concreto, el test "UD" consiste en someter la muestra a una energía entre 30 y 115 vatios durante 5 ó 10 segundos. En todos los casos, los agregados han sido previamente humectados a pF1. Los ultrasonidos se aplican en un medio acuoso a 10 mm por debajo de la superficie del agua, 1/4 de la profundidad total. El agua utilizada es siempre destilada y su volumen total de 40 ml. Tras el tratamiento se contabilizaban los agregados supervivientes y el peso de la muestra que atraviesa (también la que no) un tamiz de 2,8 mm de luz. El generador de ultrasonidos utilizado es el modelo Sanfier 1312 (Branson Sonic Power Company, Danbury, Connecticut) (Imeson y Vis, 1984).

Para el método por impacto de gotas se construyó un generador de gotas y un regulador de paso para determinar la velocidad del goteo. Las gotas producidas -siempre con agua destilada- son precipitadas desde un metro de altura sobre un tamiz de 2,8 mm a través de un tubo de polietileno de 15 cm de diámetro, el cual evita alteraciones en la trayectoria de las gotas. El peso medio de las gotas utilizadas ha sido de 0,1 gramos. Con este método se han aplicado dos test:

-TDI: "*Ten Drop Impacts*", consiste en someter a un agregado a la energía de diez impactos de gota, determinando la muestra superviviente -no dispersada- mediante un tamiz 2,8 mm.

-CND: "*Counting the Number of Drops*", consiste en contar el número de impactos de gota necesarios para romper un agregado. También aquí, el umbral que determina la rotura es el paso de la muestra por un tamiz de 2,8 mm de luz. El número de repeticiones fue de al menos 20 y se contaron un máximo de 200 gotas por agregado. También se hicieron anotaciones de la forma en la que se producía la rotura del agregado: desmoronamiento, división en varios subagregados, influencia de las raíces, etc. (Imeson y Vis, 1984).

Para los dos test por impacto de gota (TDI y CND) se utilizaron agregados de 4-4,8 mm de diámetro, secos al aire y humectados a pF1 durante 24 horas, mientras que para el test UD sólo se utilizaron los húmedos.

En cada zona de estudio se describió un perfil con varios horizontes edáficos, en cuya descripción se hizo especial hincapié en las características de la estructura (FAO, 1977). En cada horizonte se determinó el contenido en materia orgánica (método de Walkley-Back), la textura según la clasificación simple de la U.S.D.A., el contenido en carbonato cálcico (calcimetría de Bernard), el color en seco según la tabla Munsell y el contenido en humedad en el momento del muestreo (por gravimetría).

Se seleccionaron dos zonas de estudio en el sur de la provincia de Valencia, en la comarca de La Costera. Una de ellas se encuentra en el término municipal de *Genovés*, junto al de Benigànim, a una altura de 300-350 m. s. n. m. y sobre calizas cretácicas (IGME, 1981). La segunda área de estudio se encuentra al sur del término municipal de *Canals*, en la partida denominado *Bolbens*, a una altura semejante y sobre idéntica litología (IGME, 1976). Ambas zonas pertenecen a la cuenca de drenaje del río Albaida, afluente del río Júcar, y se encuentran en la parte más septentrional del Prebético: la *Serra Grossa*.

Tabla 1. Características de los suelos de Genovés y Bolbens

	Orientación (°)	Pendiente (°)	Musgos (%)	Plantas (%)	Piedras (%)
GENOVES	354	13	25	82	35
BOLBENS	358	14	2	30	55

Las precipitaciones medias anuales son elevadas, 688 mm en el observatorio de Xàtiva, aunque están marcadas por una gran estacionalidad y por fuertes variaciones interanuales. Las dos zonas están situadas al noroeste del núcleo de máximas precipitaciones del País Valenciano (Peñarrocha, 1991).

Tanto la zona localizada en Genovés (GE) como la de Canals (BO) presentan características geomorfológicas, botánicas y edáficas idénticas (Cerdà y Calvo, 1991), si bien como consecuencia de un incendio forestal reciente (dos años antes de la toma de muestras) la segunda de las zonas presenta una cubierta vegetal inferior (tabla 1). Normalmente, los suelos se desarrollan en las hendiduras de la roca caliza, apareciendo litosoles y rendzinas en las partes medias y altas, y luvisoles en las bajas, donde la cubierta edáfica es más continua.

En cada zona se ha seleccionado un perfil-tipo de las partes media-bajas de las laderas norte. Se han muestreado cuatro niveles del perfil: A₁ y A₂ corresponden a la parte superior y media-inferior del horizonte orgánico, y B₁ y B₂ a las partes media-superior y media-inferior del horizonte argílico, respectivamente.

3. Resultados

3.1. Características de los suelos

Los suelos estudiados en **Genovés** presenta una cubierta superficial dominada por la vegetación, tanto plantas como musgos, aunque la pedregosidad también es importante (tabla 1). Los fragmentos de roca aparecen en superficie, sin estar incrustados en la matriz del suelo. En superficie hay una costra de líquenes y musgos, lo que acompañado por la hojarasca favorece la preponderancia de superficies sin morfologías de erosión.

Las superficies de los suelos de **Bolbens**, al contrario que en Genovés, presenta una preponderancia de la pedregosidad y suelo desnudo (costras superficiales y restos de carbones) sobre los espacios cubiertos de vegetación. La hojarasca, los líquenes y los musgos son abundantes en Genovés, pero insignificante en Bolbens.

Los perfiles tipo de las dos zonas de estudio son los siguientes (Fig. 1):

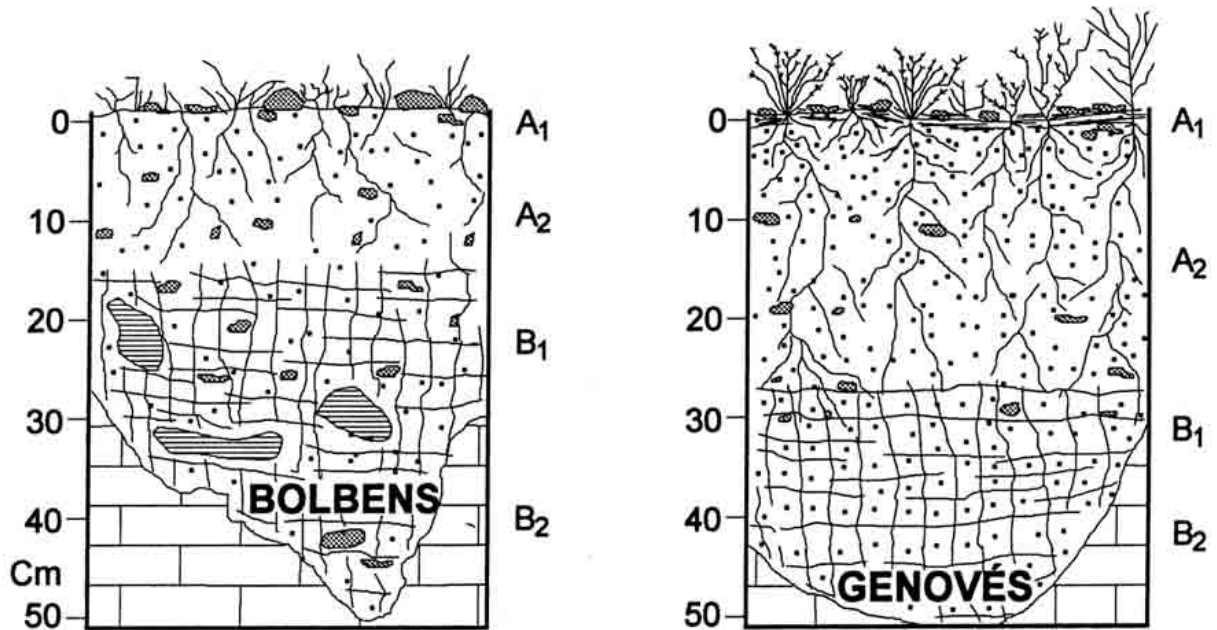


Fig. 1. Perfiles tipo de las zonas de estudio: Bolbens y Genovés

GENOVÉS

-Horizonte A₁, (0-3 cm): Pardo oscuro (7.5 YR 5/8) en seco, franco arenoso, estructura granular mediana a gruesa débil, no adherente, no plástico, friable a suelto en húmedo y blando en seco, con abundantes raíces finas y gruesas.

-Horizonte A₂, (3-25 cm): Pardo oscuro (7.5 YR 5/8) en seco, franco arenoso, estructura granular gruesa moderada, no adherente, no plástico, friable en húmedo y ligeramente duro en seco, con abundantes raíces finas.

-Horizonte B₁, (25-35 cm): Rojo amarillento (5 YR 5/6) en seco, arcilloso, estructura prismática gruesa fuerte, ligeramente adherente y ligeramente plástico, friable en húmedo y duro a muy duro en seco, pocas raíces.

-Horizonte B₂, (35-50 cm): Rojo amarillento (5 YR 5/6) en seco, arcilloso, estructura prismática mediana gruesa, ligeramente adherente y ligeramente plástico, muy friable en húmedo y duro en seco, sin raíces.

BOLBENS

-Horizonte A₁, (0-3 cm): Pardo oscuro (7.5 YR 5/6) en seco, franco arenoso, estructura migajosa mediana débil, no adherente, no plástico, friable en húmedo y blando en seco, con muy pocas raíces.

-Horizonte A₂, (3-15 cm): Pardo oscuro (7.5 YR 5/5) en seco, franco arenoso, estructura granular gruesa moderada, no adherente, no plástico, friable en húmedo y ligeramente duro en seco, pocas raíces.

-Horizonte B₁, (15-35 cm): Rojo amarillento (5 YR 5/6) en seco, arcilloso, estructura en bloques subangulares gruesos fuerte, ligeramente adherente y ligeramente plástico, muy friable en húmedo y duro en seco, pocas raíces.

-Horizonte B₂, (35-50 cm): Rojo amarillento (5 YR 4/6) en seco, arcilloso, estructura en bloques subangulares muy gruesos fuerte, ligeramente adherente y ligeramente plástico, muy friable en húmedo y muy duro en seco, sin raíces.

Las diferencias entre ambos suelos son mínimas, pero afectan especialmente a los horizontes superficiales como consecuencia del reciente incendio forestal -dos años- en Bolbens, lo que provoca la desaparición de raíces, formación de costras, etc. La zona de Genovés también fue afectada por un incendio 10 años antes del estudio, aunque la vegetación y el suelo están perfectamente regenerados.

Ambos suelos presentan un elevado contenido de arenas en el horizonte orgánico y un horizonte argílico en profundidad. La materia orgánica muestra una distribución marcada por la reducción en profundidad, al contrario que la humedad. El contenido en carbonato cálcico no muestra un patrón definido (tabla 2). En el caso de Bolbens, la textura es ligeramente más grosera que la de Genovés, el contenido de materia orgánica y humedad en los horizontes superficiales es inferior y hay una mayor acumulación de carbonato cálcico en superficie, lo que nos confirma el encostramiento antes comentado (ver tabla 2).

Tabla 2. Características físicas y químicas (%) de los distintos horizontes de los suelos de Bolbens y Genovés

	M. Org. (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Ca. Cal. (%)	Humed. (%)
GENOVES						
A1	5.96	56.24	25.54	17.22	3.12	1.61
A2	2.35	52.34	23.24	24.42	3.21	2.34
B1	1.59	27.19	22.51	50.30	2.23	6.87
B2	0.59	23.24	25.31	51.54	4.91	7.98
BOLBENS						
A1	4.65	68.76	13.76	17.48	6.01	1.03
A2	2.09	61.86	15.43	22.71	2.14	2.52
B1	1.03	34.76	23.65	41.59	2.01	5.09
B2	0.48	32.98	24.12	42.90	5.21	9.32

3.2. El caso de Genovés

La aplicación del test **CND** a los agregados humectados a pF1 de los horizontes del perfil de **Genovés** indica que son altamente estables: el 40 % de los agregados de todos los horizontes necesitan más de 200 impactos de gotas para ser destruidos (Fig. 2). Los agregados de los horizontes A₂ son incluso más estables, ya que el 100 % de la muestra consigue resistir los 200 impactos de gota. También se observa una disminución de la estabilidad en los agregados con el aumento de la profundidad, con la excepción del horizonte superficial (A₁).

El contenido inicial de humedad de los agregados es determinante de su estabilidad. Como se muestra en la figura 5, las muestras sometidas humectadas a pF1 (A_{1h}, A_{2h}, B_{1h}) son mucho más estables que la misma muestra en seco (A_{1s}, A_{2s}, B_{1s}). En los horizontes superficiales los cambios sufridos por la humectación de los agregados es muy importante, especialmente en el horizonte A₂, en el que sólo el 20 % de la muestra en seco resiste 200 impactos de gota, mientras que en húmedo todos los agregados resisten los 200 impactos de gota.

El horizonte superficial sigue siendo el más erosionable en seco, mientras que los agregados del horizonte A₂ son menos estables que los del B₁ cuando el test se realiza con agregados secos. Esto demuestra que los agregados del horizonte orgánico están más afectados por la reducción de la humedad que los del argílico (Fig. 3).

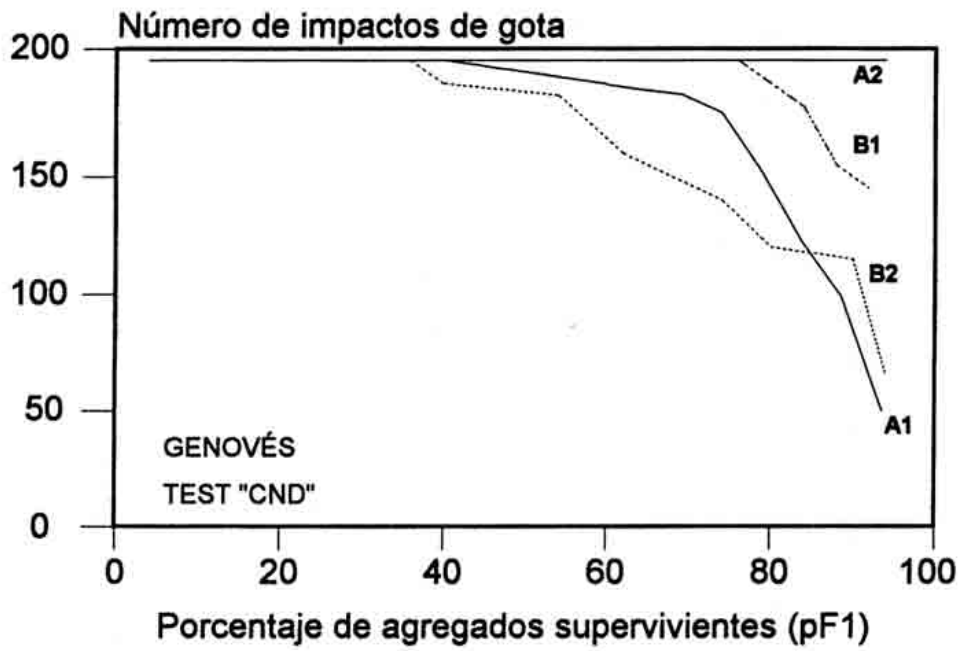


Figura 2. Relación entre el número de impactos de gota y el porcentaje de los agregados supervivientes en diferentes horizontes de los suelos de Genovés. Muestra humectada a pF1

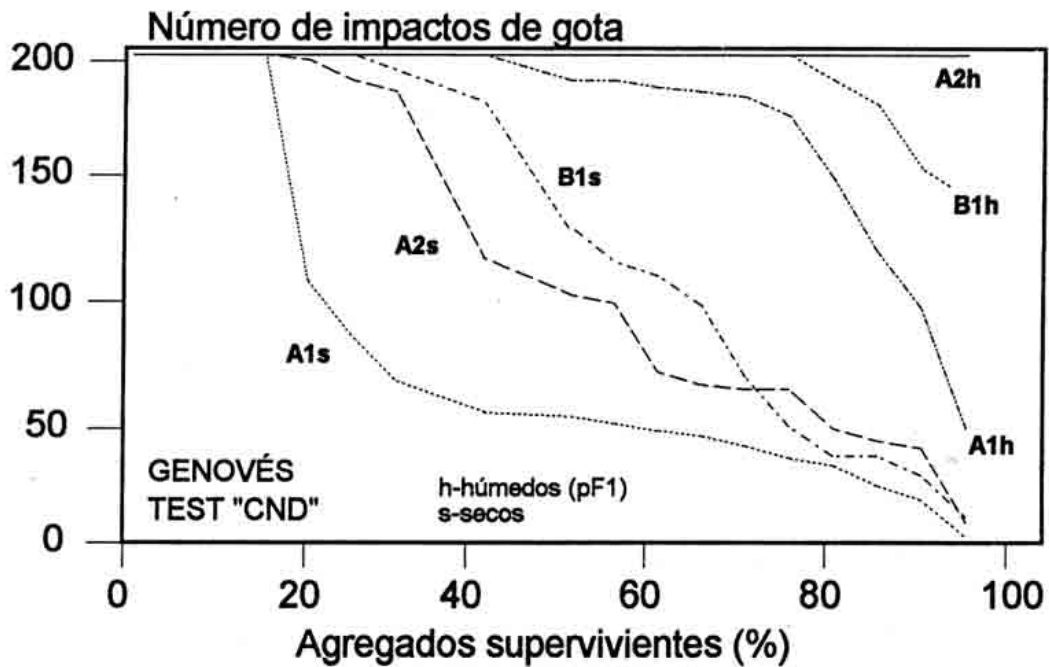


Figura 3. Influencia del contenido de agua de los agregados ante las impactos de gotas en Genovés. Secos (s) y a pF1 (h). Genovés

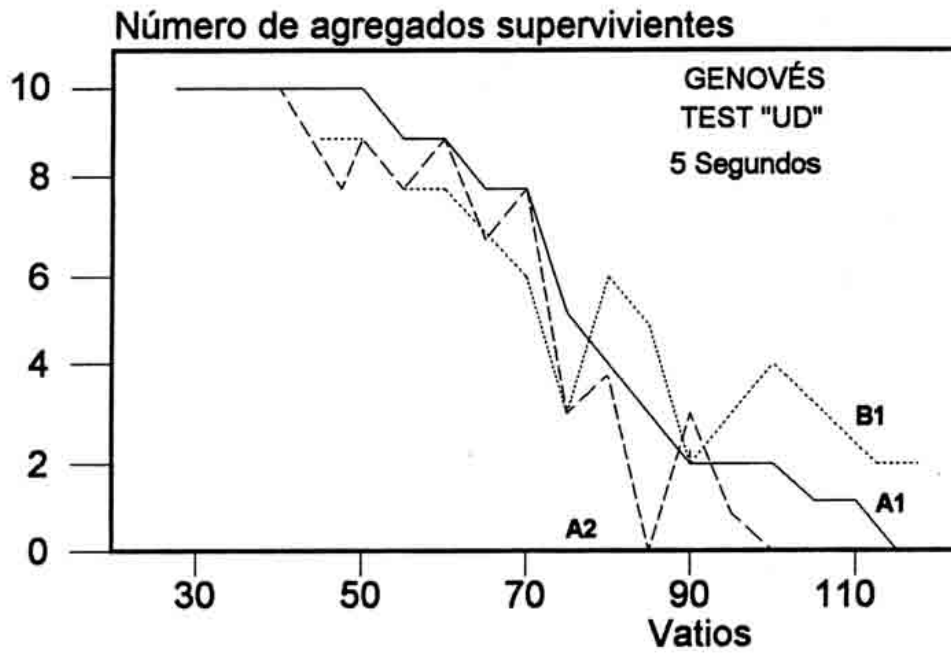


Figura 4. Número de agregados supervivientes a distintos niveles de energía (Vatios) mantenida durante 5 segundos. Genovés

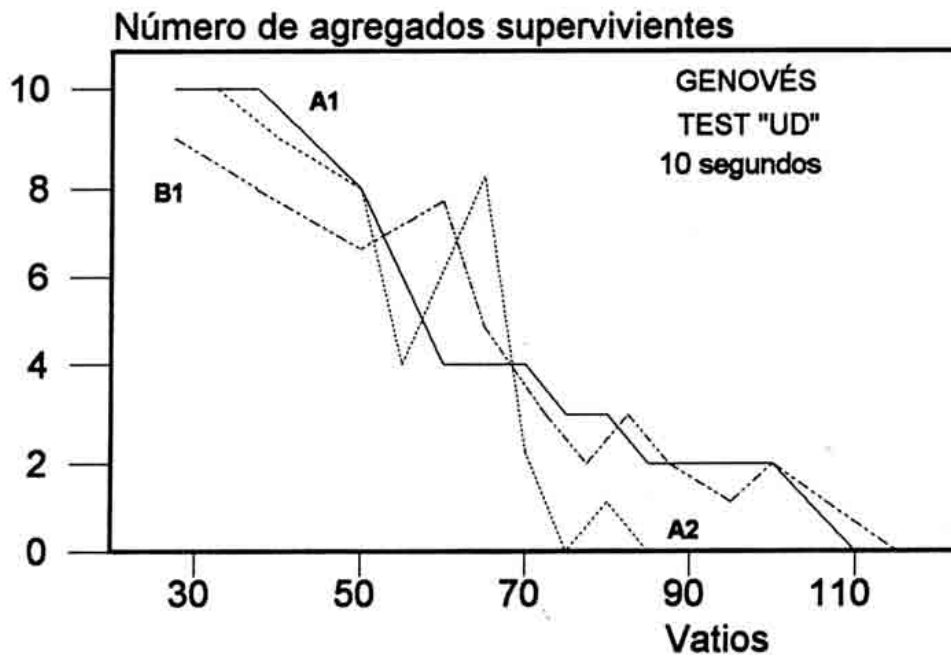


Figura 5. Número de agregados supervivientes a distintos niveles de energía (Vatios) mantenida durante 10 segundos. Genovés

En las muestras sometidas a dispersión por ultrasonidos (UD) se observa un comportamiento similar, tanto cuando el experimento tiene una duración de 5 como 10 segundos (Fig. 4 y 5). No hay diferencias claras entre los tres horizontes presentados debido a que no se alcanzó el nivel de energía suficiente para agregados tan estables. Entre las muestras A₁ y A₂ las diferencias son poco apreciables a bajos niveles de energía, si bien A₂ se podría considerar como la menos estable en estas situaciones. Con aplicaciones superiores a 80 vatios A₂ se muestra como muy inestable (ningún agregado sobrevive), y por contra en A₁ sobreviven el 20% de los agregados hasta 110 vatios de energía. Estas diferencias pueden deberse a la selección natural que sufre continuamente la muestra de superficie sometida a agentes externos, lo que propicia que un porcentaje de ella sean agregados de gran resistencia.

El horizonte B es más estable a intensidades de energía altas, pero hay que destacar que con duraciones de 10 segundos estas diferencias desaparecen, y serían menores con un aumento del tiempo de aplicación del experimento, como ocurre en el test CND donde aunque la intensidad (un golpe de gota de 0,1 gramos desde 1 metro) es baja, la duración es elevada (200 gotas).

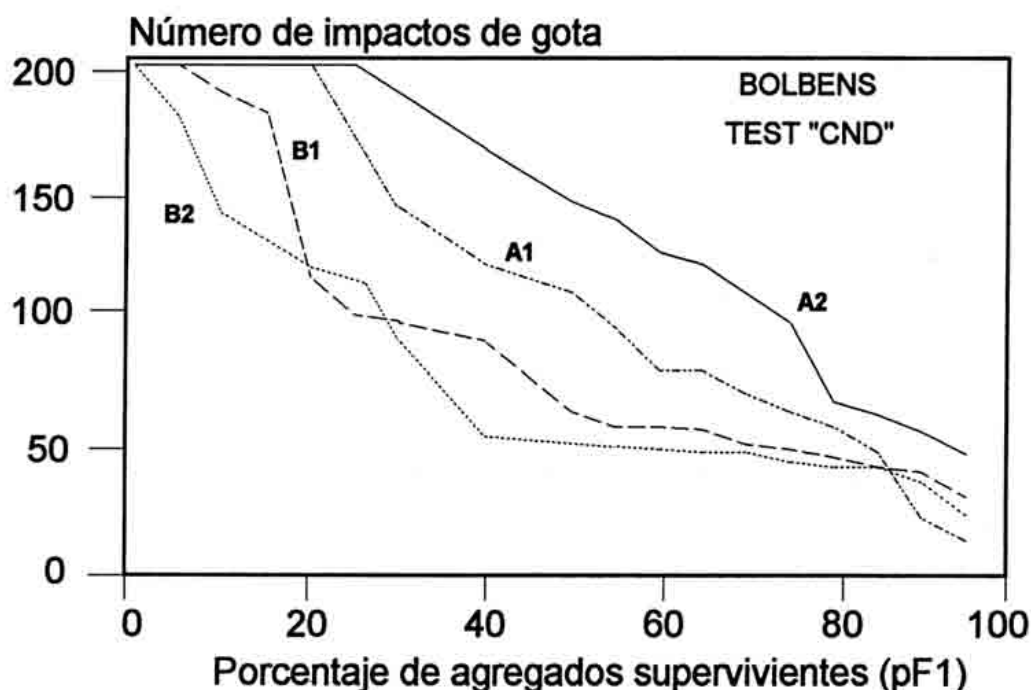


Figura 6. Relación entre el número de impactos de gota y la porcentaje de agregados supervivientes en diferentes horizontes. Genovés

3.3. El caso de Bolbens

La aplicación del test CND sobre los agregados humectados a pF1 de los distintos horizontes del perfil de Bolbens indica una clara gradación entre los diferentes horizontes, ya que al igual que en Genovés, la profundidad favorece una mayor fragilidad de los agregados (Fig. 6). El horizonte A₁ es una excepción, como también ocurría en Genovés. Las diferencias más significativas entre muestras se alcanzan entre el 40 y 60 % de los agregados supervivientes. En este intervalo, el número de impactos de gota necesarias para provocar la desagregación ha sido de 150 para A₂, 110-120 para A₁, 70 para B₁ y 5 para B₂. También el número de agregados supervivientes a los 200 impactos de gotas nos muestran una gradación clara entre los diferentes horizontes: 30 % en A₂, 20 % en A₁, 5 % para B₁ y 0 % para B₂.

La influencia del contenido de agua de los agregados es similar a la encontrada en los suelos de Genovés. La estabilidad de los agregados en todos los horizontes es inferior en seco, siendo el horizonte

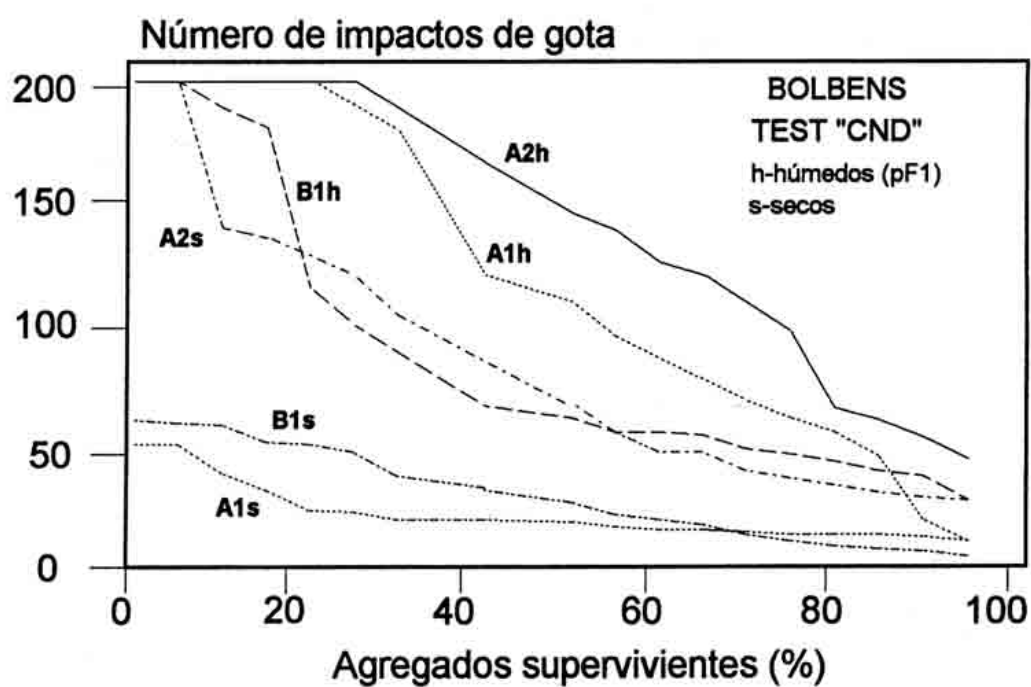


Figura 7. Influencia del contenido de agua de los agregados ante las impactos de gotas en Bolbens. Secos (s) y a pF1 (h)

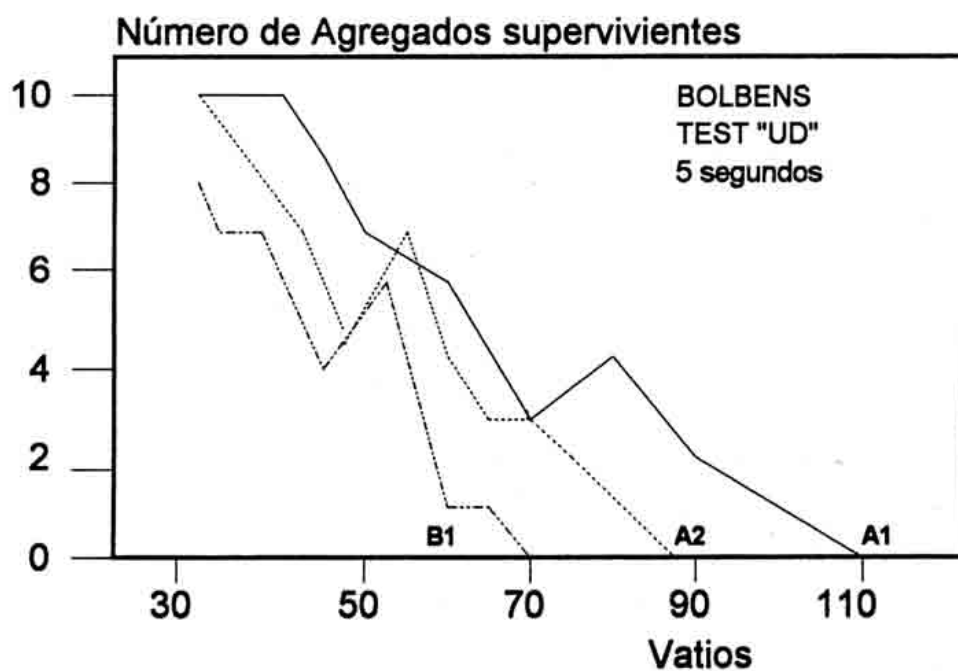


Figura 8. Número de agregados supervivientes a distintos niveles de energía (Vatios) mantenida durante 10 segundos, Bolbens

argílico (B₁) el menos afectado por todos estos cambios, seguido por el horizonte A₂ y A₁ (Fig. 7). Este último tiene un comportamiento totalmente diferente, como lo demuestra que el 30% de los agregados a pFI necesitan más de 200 impactos de gota, mientras que en seco se necesitan tan sólo entre 25 y 50 impactos de gota para producir su desagregación.

Al contrario que en Genovés, en los análisis con ultrasonidos (test "UD") se aprecian diferencias importantes entre los horizontes con tan sólo 5 segundos de duración del experimento, lo que muestra ciertos rasgos de fragilidad de la muestra de la zona incendiada (Fig. 8). Los análisis con ultrasonidos nos muestran también una gradación entre los diferentes horizontes, aunque estas no coinciden plenamente con el test CND. A₁ es el horizonte más estable, seguido por A₂ y B₁, apareciendo las diferencias más apreciables a partir del umbral de 70 vatios. Las diferencias son muy claras tanto con la aplicación de 5 como 10 segundos (Fig. 9).

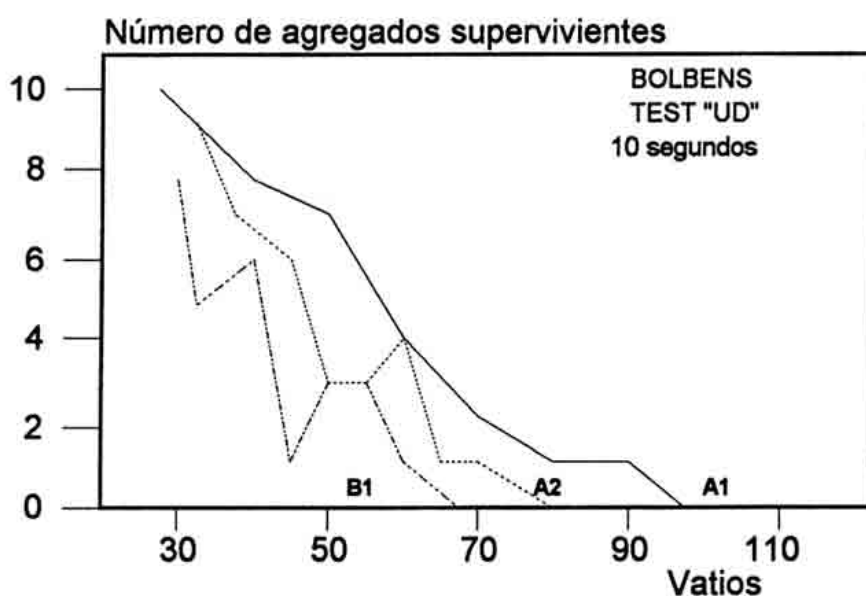


Figura 9. Número de agregados supervivientes a distintos niveles de energía (Vatios) mantenida durante 5 segundos, Bolbens

En los experimentos con ultrasonidos, tanto en Bolbens como en Genovés, un aumento del tiempo de aplicación de la energía reduce el número de agregados supervivientes. Generalmente esta diferencia estriba en 2 ó 3 agregados para la misma energía aplicada, o 10-15 vatios para el mismo número de agregados supervivientes. A pesar de esta correspondencia podemos encontrar diferencias mucho mayores o incluso situaciones puntuales en las que a mayor energía el número de agregados dispersados sea menor.

3.4. El test UD y su validez

Las posibilidades de determinación del grado de estabilidad de los agregados con la dispersión por ultrasonidos (UD) viene definida por la cuantificación, bien de los agregados supervivientes, bien de la muestra superviviente y no superviviente. La primera de las posibilidades es rápida, aunque menos precisa que la segunda, debido a que un agregado no destruido y cuantificado como tal normalmente pierde parte de su masa, especialmente cuando el test se realiza en un medio acuoso, como en este caso. La figura 10 muestra el comportamiento de tres horizontes del suelo de Bolbens, comparando los resultados según se mida el número de agregados o la muestra superviviente. En este caso como en el resto de los estudiados se observa que el porcentaje de agregados supervivientes es siempre mayor que el porcentaje de muestra superviviente. Además los cambios en las tendencias y los umbrales son siempre más bruscos cuando se

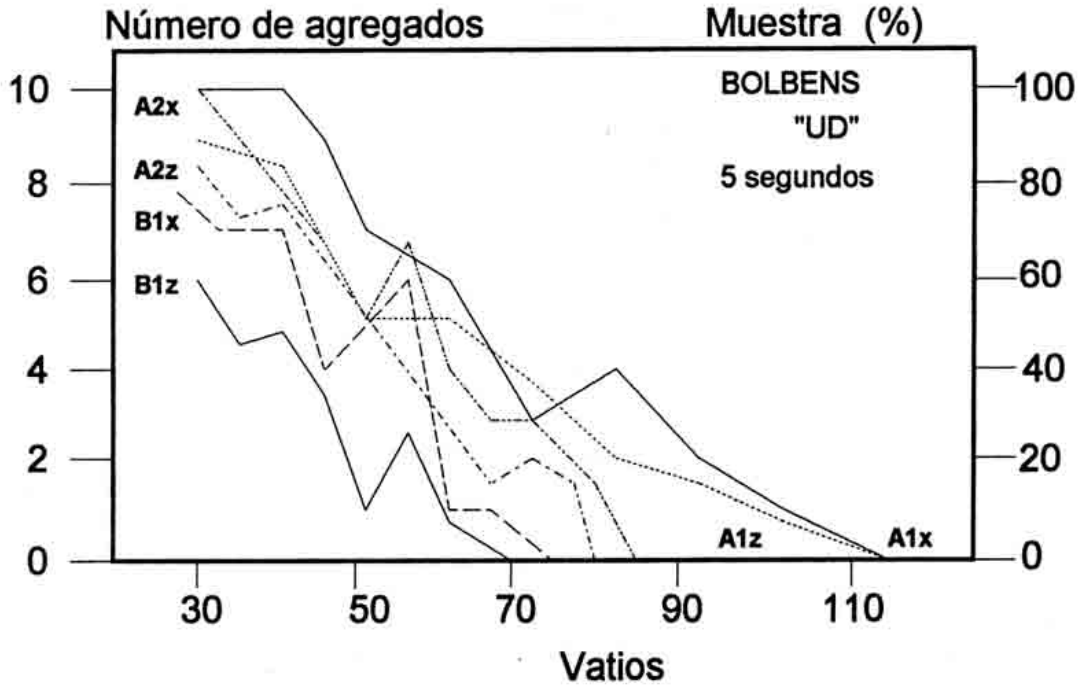


Figura 10. Medidas del número de agregados (x) o muestra superviviente (z), Bolbens

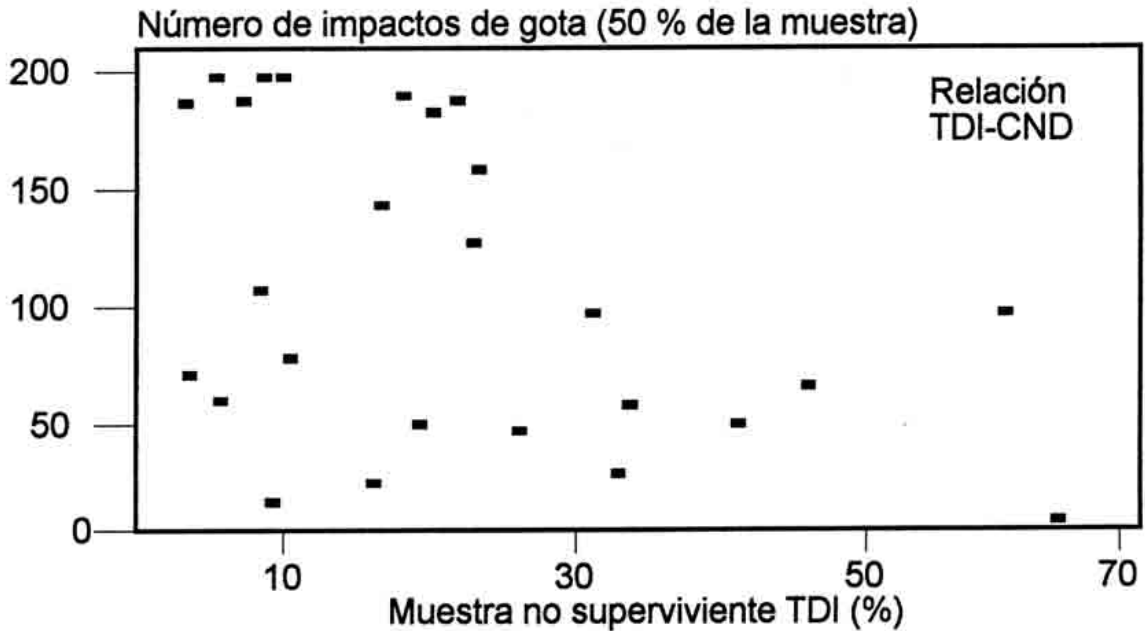


Figura 11. Relación entre la muestra no superviviente (TDI) y el número de impactos de gota al 50% de la muestra

miden los agregados que la muestra superviviente. La mayor precisión de la medida de la muestra superviviente viene acompañada por una mayor objetividad, ya que en el laboratorio hay que discriminar visualmente los agregados supervivientes.

3.5. El test TDI y su relación con CND y UD

Con el test **TDI** no se han encontrado diferencias apreciables entre las muestra de Bolbens y Genovés, tal vez por que el nivel de energía con el que se actúa en este test no supera el umbral en el que los agregados de estos suelos empiezan a dispersarse. Para el test **CND** este umbral estaba en muchos casos entre el 40 % y el 60 % de los agregados supervivientes a 200 impactos de gota o bien a un nivel de energía proveniente de ultrasonidos de 45-50 vatios (test "UD"). Todo esto explica que normalmente la muestra superviviente haya superado el 60 % en casi todos las muestras tratadas tanto con el test **CND** como **UD**.

Las figuras 11, 12, 13 y 14 muestran la relación entre los dos test realizados por goteo a pesar de la elevada dispersión de la muestra ($r^2 < 0,5$). Estos gráficos muestran la complejidad de las relaciones entre **TDI** y **CND**, así como la elevada variabilidad, aunque se puede deducir algunas tendencias claras. Se observa un aumento de la muestra no superviviente con el menor número de impactos de gota necesarios para la rotura de los agregados. Esta relación se confirma con el número de impactos de gotas necesario para destruir el 50% de los agregados (**CND**), el cual es mayor en los horizontes que presentan una mayor proporción de muestra superviviente en el test **TDI**.

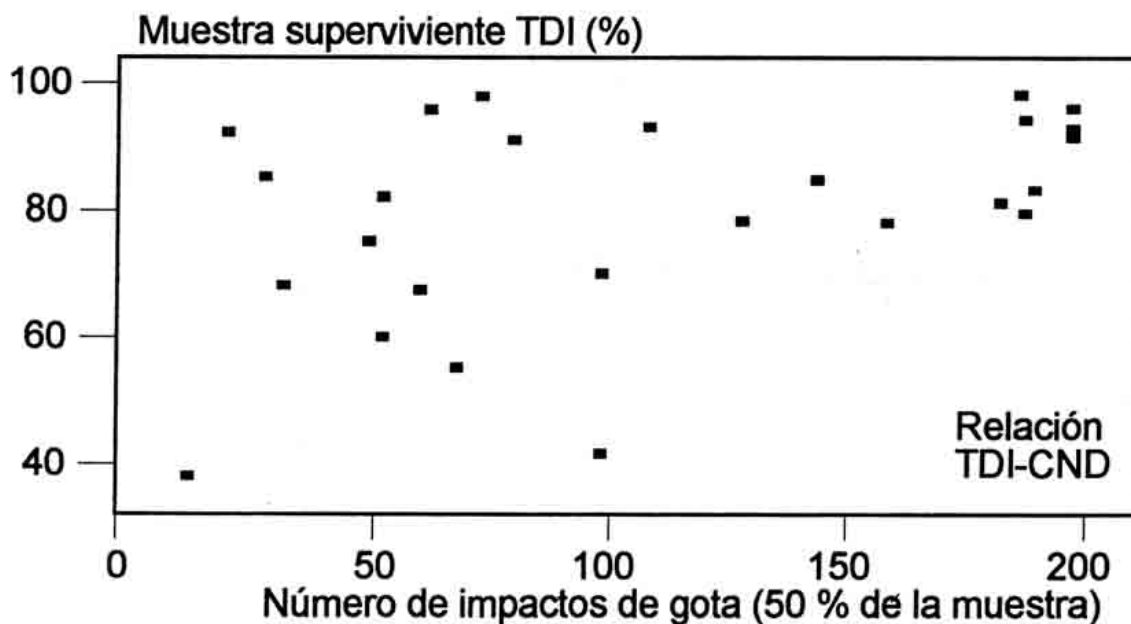


Figura 12. Relación entre el número de impactos de gotas para la dispersión del 50% de los agregados (**CND**) y la muestra superviviente (**TDI**)

Relaciones semejantes a las anteriores se encuentran al comparar el peso de la muestra superviviente del test **TDI** con el número medio de impactos de gota de cada muestra (**CND**), o bien el número total de gotas necesarias para conseguir la destrucción de los 20 agregados utilizados en el test **CND**.

En general encontramos una clara correspondencia: cuanto más estable es una muestra ante el test **CND**, más estable lo es ante el test **TDI**. A pesar de esto, las grandes variaciones existentes no permiten obtener relaciones directas y lineales entre los resultados de los dos tests.

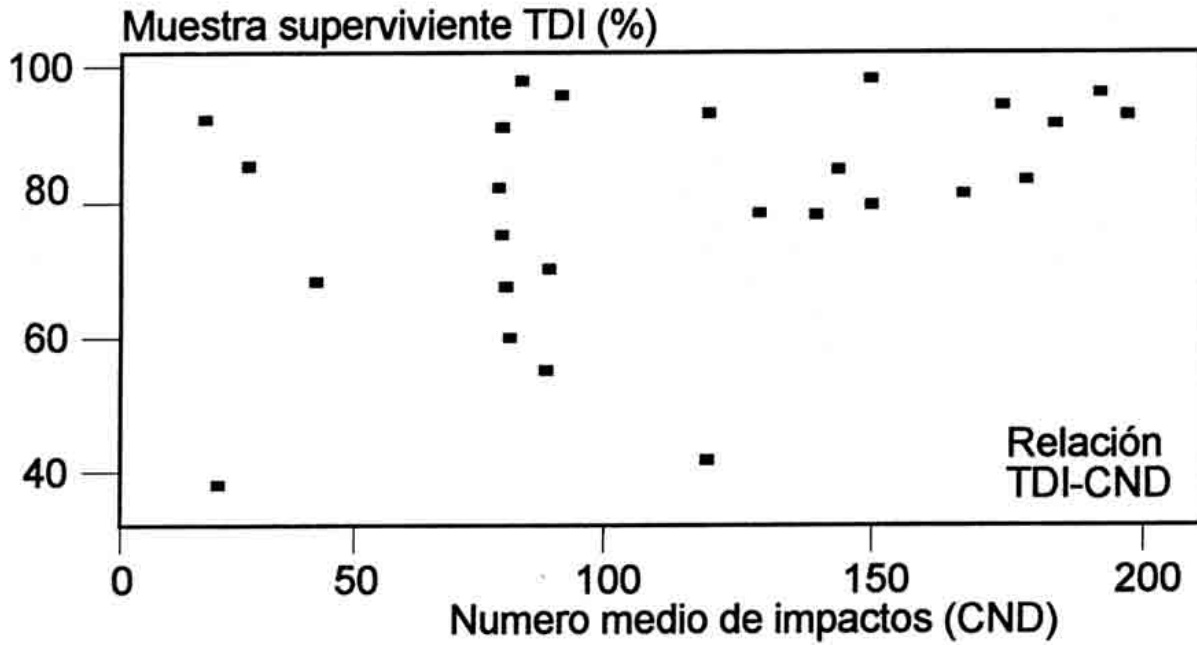


Figura 13. Relación entre el número medios de impactos de gotas (CND) y la muestra superviviente (TDI)

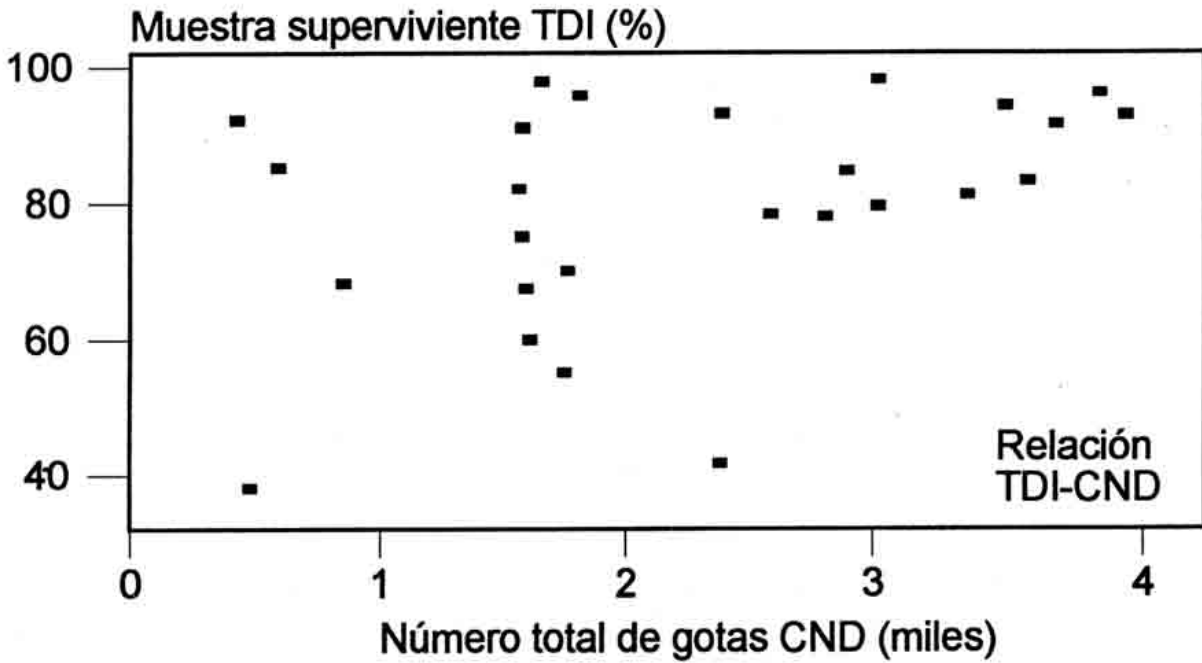


Figura 14. Relación entre el número total de impactos de gotas (CND) y la muestra superviviente (TDI)

La relación entre UD-TDI es tan compleja como entre TDI y CND. Hay una correspondencia entre los agregados supervivientes en UD respecto a la muestra superviviente de TDI (Fig. 15), aunque es difícil de establecer una relación lineal por la gran dispersión de la muestra ($r^2 > 0,41$). En general, a las muestras con mayores niveles de estabilidad en el test TDI corresponde un mayor número de agregados supervivientes, tanto con los test del método UD realizado a 5 como a 10 segundos.

La anterior tendencia, aunque la variabilidad es muy elevada, se confirma al relacionar los mismos métodos, pero tomando como parámetro la muestra superviviente en el test UD (Fig. 16). En todos los casos, la relación es positiva, tanto en agregados secos como húmedos.

En todos los gráficos, presentados en la comparación UD-TDI se ha utilizado el umbral de 70 vatios aplicados durante 5 ó 10 segundos para UD, ya que con este nivel de energía las diferencias entre las muestras de los distintos horizontes de Genovés y Bolbens son más evidentes.

Tanto utilizando la muestra o el número de agregados nos encontramos con que las relaciones entre UD-TDI muestran un aumento de la muestra superviviente en TDI acompañado de un aumento de los agregados o muestra superviviente en UD.

3.6. Morfologías adoptadas por los agregados durante el proceso de destrucción por impactos de gotas

Durante la realización de los test TDI y CND se tomaron anotaciones relativas a la forma que adoptaba el agregado en el proceso de dispersión. Del análisis de estos datos se ha obtenido dos modelos de destrucción de los agregados principales:

1.- Agregados provenientes de horizontes orgánicos: los impactos de gotas producían paulatinamente la desagregación del agregado. Se observó un desgranado o desmoronamiento de los agregados, los cuales sufrían relentizaciones periódicas cuando el agregado estaba formado a partir de raíces, las cuales le daban mayor consistencia.

2.- Agregados provenientes de horizontes argílicos: la destrucción se producía mediante la fragmentación de los agregados (2, 3 ó 4 partes), que a su vez se dividían en partes más pequeñas. El proceso de destrucción, al contrario que en el modelo de los agregados del horizonte orgánico no era progresivo, sino que estaba dominado por umbrales, 2 ó 3, hasta que se destruía completamente.

4. Discussion

En general, se observa un aumento de la estabilidad de los agregados con la humedad. Estas diferencias se pueden deber a que con el impacto de la gota cuando el agregado tiene un alto grado de humectación no se produce ningún efecto excepcional, pero cuando está seco, la presión del agua junto al impacto de la gota produce un efecto de aire entrampado que puede terminar en una salida muy rápida de éste (también llamada explosión por algunas investigadores) que destruye los agregados (Farres, 1987). Este comportamiento implicaría que la producción de sedimentos por estos suelos durante la lluvias se reduciría con el tiempo, al humectarse el suelo, y que sería menor la concentración de sedimentos durante las estaciones húmedas.

De los resultados aquí presentados, se desprende que el uso del test CND debe ser restringido a agregados con una estabilidad media. Esto significa que deben ser agregados que superen el test de Emerson sin que se produzcan cambios en su estabilidad, como ocurre con los suelos estudiados por nosotros, y que a la vez no superen el test CND más del 80 % de la muestra. Los agregados de los suelos estudiados, especialmente el de Genovés está cerca del segundo umbral, por lo que se decidió utilizar para todas las muestras 200 impactos de gota en lugar de 50 ó 100 como hacen otros autores (Imeson y Vis, 1984; Ubeda *et al.*, 1990). En el caso de suelos con agregación muy pobre la aplicación del test puede dar lugar a resultados muy similares entre muestras. Para este último caso se aconseja el uso del test TDI, en el que la energía aplicada es inferior. Con el test UD se debe modificar la duración e intensidad de la aplicación de los ultrasonidos dependiendo de la calidad de la agregación de los suelos.

Un ejemplo de la importancia del nivel o umbral de energía a utilizar es que en el test TDI la energía aplicada es mucho menor a UD o CND, por lo que no aparecen diferencias significativas entre muestras en el primero, y su relación con UD y CND, aunque positiva, presenta una elevada variabilidad.

El método UD tiene la posibilidad de variar los niveles de energía con que funciona. Así se puede aumentar la intensidad (hasta 115 vatios en nuestro caso) o bien la duración (5 ó 10 segundos en estos experimentos). La comparación de estos resultados ha confirmado que con bajos niveles de energía (50

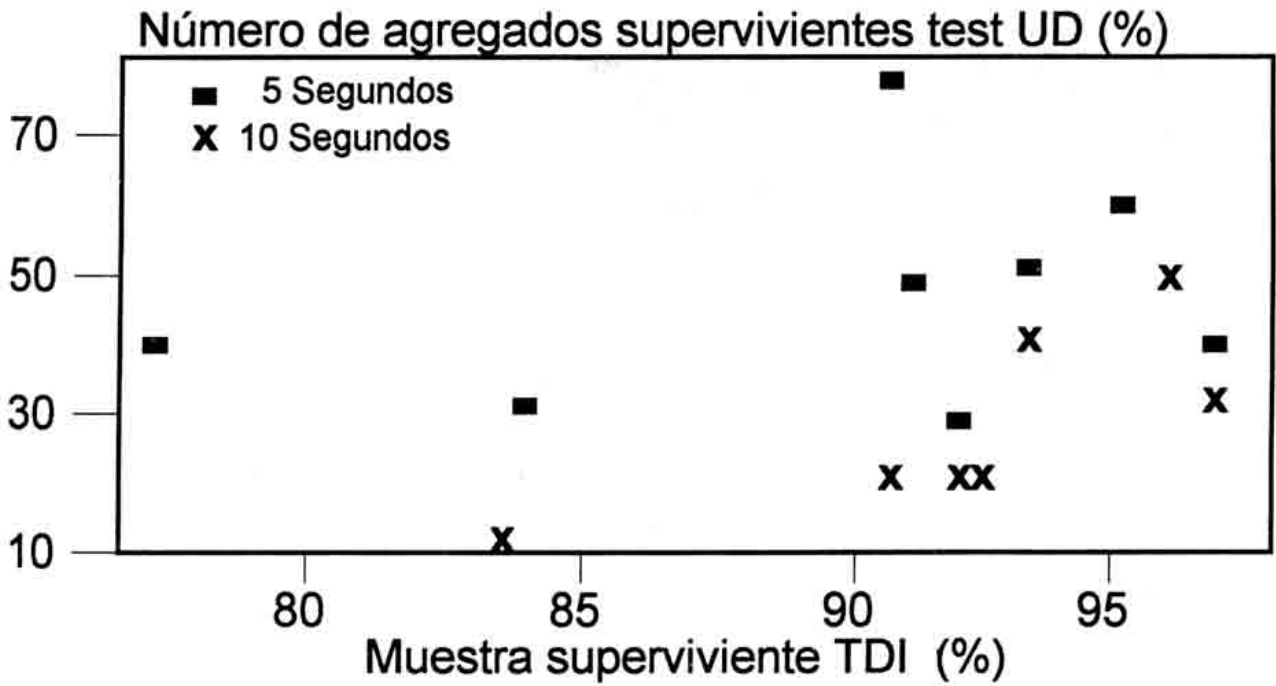


Figura 15. Relación entre la muestra superviviente (TDI) y los agregados supervivientes (UD) con dos duraciones distintas del experimento: 5 ($r^2 = 0,07$) y 10 ($r^2 = 0,12$) segundos en Genovés

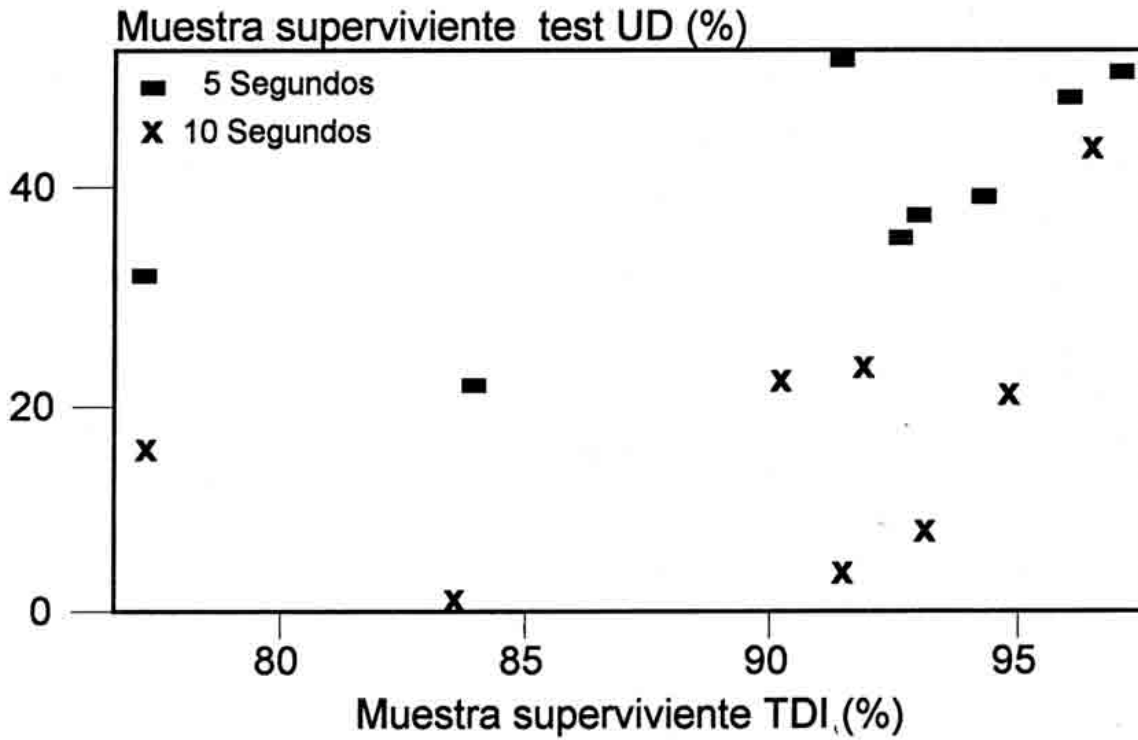


Figura 16. Relación entre la muestra superviviente (TDI) y los agregados supervivientes (UD) con dos duraciones distintas del experimento: 5 ($r^2 = 0,41$) y 10 ($r^2 = 0,14$) segundos en Bolbens

váticos) las diferencias son inapreciables, siendo el umbral de 70 váticos donde se observan comportamientos diferentes en la estabilidad de los agregados de los diferentes muestras de Bolbens. En Genovés, donde los agregados son más estables, incluso con una duración de la aplicación de 10 segundos del test UD no se alcanza el nivel de energía necesario para la destrucción de los agregados de forma que se produzca una diferenciación clara entre los distintos horizontes como se ha conseguido con CND para los dos suelos, y con UD para Bolbens.

Se ha observado una relación positiva entre el contenido de materia orgánica de los suelos y su estabilidad, pero en cambio esta relación es negativa con las arcillas, lo que nos indica que es mucho más importante el primer factor que el segundo, al menos en estos suelos. El aumento del contenido en arcillas con la profundidad (horizontes argílicos) y la reducción de la materia orgánica, ha supuesto encontrar una menor estabilidad de los agregados con el aumento de la profundidad. Esta relación es inversa para los horizontes orgánicos, ya que A₁ se ha mostrado más frágil que A₂, tal vez debido a su exposición a la intemperie, donde cambios en temperatura, humedad y alteraciones son más intensas, especialmente tras incendios forestales, como en este caso.

Por lo que respecta a la correspondencia entre la determinación de la estabilidad de los agregados con técnicas sofisticadas de laboratorio, como las que aquí presentamos, respecto a la descripción realizada en el campo (FAO, 1977), es inexistente, siendo los resultados contradictorios. Los agregados provenientes de los horizontes argílicos se describen como fuertes, mientras que los orgánicos lo son como de estructura moderada o débil, en cambio son estos últimos los que tienen una agregación más estable.

Respecto a la consistencia del suelo, muy relacionada con la estabilidad de los agregados, se observa que son más estables en húmedo que en seco, mientras que en la descripción en el campo se presentan como menos estables cuando se humectan ante la presión de los dedos.

5. Conclusiones

En los dos suelos estudiados se observa una gradación de la estabilidad dependiente de la profundidad, ya que el porcentaje de agregados supervivientes a los test es mayor cuanto más cerca de la superficie fue tomada la muestra. Esta gradación se ve ligeramente truncada en el horizonte A₁, ya que este es menos estable que el horizonte inmediatamente inferior A₂, alteración sin duda debida a los efectos de su exposición continuada a agentes externos.

Paradójicamente se ha encontrado una relación negativa entre estabilidad de los agregados y contenido en arcilla, debido a la preponderancia de la materia orgánica en el control de la agregación. Esto ha hecho que con el aumento de la profundidad los agregados sean más inestables, existiendo un claro umbral en el contacto entre el horizonte orgánico y el argílico.

Se ha puesto de manifiesto la poca relación de las descripciones realizadas en el campo con las mediciones tomadas en el laboratorio. Sin duda esta divergencia se debe a que en el campo, la estructura y la consistencia del suelo se describe a partir de su morfología y su resistencia a la destrucción por la presión de los dedos, mientras que en laboratorio la medición se realiza con impactos de gota, proceso idéntico al natural, o con ultrasonidos.

Los distintos test y métodos aplicados presentan relaciones positivas, pero la dispersión de los resultados hace difícil encontrar relaciones claras. El método UD se muestra como el más versátil ya que con él se puede variar la energía aplicada, tanto en intensidad como en duración. El único problema reside en encontrar el nivel de energía adecuado para diferenciar unas muestras de otras. Por otra parte CND, y especialmente TDI, son más sencillos y menos costosos.

Es muy importante elegir el nivel de energía en el que se muestren las diferencias entre los diferentes suelos. En los casos aquí presentados, se han tenido que utilizar 200 impactos de gota con el test CND para que sea clarificador, mientras que TDI no presenta diferencias significativas entre muestras, sólo una clara relación con los resultados de CND y UD.

Hay que destacar que el aumento del contenido de agua en los agregados reduce su erodibilidad, ya que los agregados se muestran mucho más estables. Esto significa que las concentraciones de sedimentos de las escorrentías de suelos húmedos debe ser menor que en la de suelos secos.

Agradecimientos

Al "Fysisch Geografisch Bodemkundig Laboratorium" de la "Universiteit van Amsterdam", y sus componentes: A.C. Imeson, M. Boer, L.H. Cammeraat, G. Bergkamp, N. Bouma y E. van Mulligen por su colaboración durante el trabajo de laboratorio. También agradezco la beca de estancia en el extranjero concedida por la "Conselleria de Educació i Ciència", así como la revisión crítica del manuscrito por parte de M^a.J. Molina y P. García-Fayos.

Referencias Bibliográficas

- Bergsma, E. & Valenzuela, C.R.** (1981): Drop Testing Aggregate Stability of Some Soils near Merida, Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 6, 309-318.
- Cerdà, A. & Calvo, A.** (1991): Influencia del fuego en la escorrentía y la erosión (Serra Grossa, Valencia). *XII Congreso Nacional de Geografía*, Valencia, 23-27.
- Edwards, A.P. & Bremmer, J.M.** (1967): Microaggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 18, 64-73.
- Egashira, K., Kaetzu, Y. & Takuma, K.** (1983): Aggregate stability as an index of erodibility of Ando soils. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 29 (4) 473-481.
- Emerson, W.W.** (1959): The structure of soil crumbs. *Journal of Soil Science*, 10, 235-244.
- FAO** (1977): *Guía para la descripción de perfiles de suelos*. ONU-FAO, 70 p.
- Farres, P.J.** (1987): The dynamics of rainsplash erosion and the role of soil aggregate stability. *Catena*, 14, 119-30.
- Genrich, D.A. & Bremmer, J.M.** (1972): A reevaluation of the Ultrasonic-Vibration method of dispersing soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 36, 944-47.
- 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.
- Glanville, S.F. & Smith, G.D.** (1988): Aggregate breakdown in clay soils under simulated rain and effects on Infiltration. *Aust. J. Soil Res.*, 26, 111-120.
- Hinds, A.A. & Lowe, L.E.** (1980): Dispersion and dissolution effects during ultrasonic dispersion of gleysolic soils in water and in electrolytes. *Can. J. Soil. Sci.*, 60, 329-35.
- IGME** (1976): *Mapa Geológico de España (E:1/50.000)*. CANALS (Hoja 794).
- IGME** (1981): *Mapa Geológico de España (E:1/50.000)*. JATIVA (Hoja 795).
- Imeson, A.C. & Vis, M.** (1984): Assessing soil aggregate stability by water-drop impact and ultrasonic dispersion. *Geoderma*, 34, 185-200.
- Low, A.J.** (1954): The study of soil structure in the field and the laboratory. *Journal of Soil Science*, 5 (1) 19-54.
- Low, A.J.** (1955): Improvements in the structural state of soils under leys. *Journal of Soil Science*, 6 (2) 179-99.
- McCalla, T.M.** (1944): Water drop method of determining stability of soil structure. *Soil Science*, 58, 117-121.
- North, P.F.** (1976): Towards an absolute measurement of soil structural stability using ultrasound. *Journal of Soil Science*, 27, 451-9.
- 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. *1^a Reunión Nacional de Geomorfología*, Teruel, 677-685.