

Caracterización micromorfológica de costras sedimentarias desarrolladas en suelos agrícolas en Galicia (NW España)

Micromorphological characterization of sedimentary crusts developed in agricultural soils in Galicia (NW, Spain)

TABOADA CASTRO, M. M.¹; LE BISSONNAIS, Y.²; COUSSIN, I.²
& PAZ GONZÁLEZ, A.¹

Abstract

This work presents the morphological characterization of sedimentary crusts of an agricultural soil, taken from two areas of different microrelief and formed by the action of the precipitation itself. Approximate thickness, porosity and other characteristics were evaluated using the description of thin sections by optical microscopy and scanning electron microscopy.

Notable morphological variation was observed when the crusts studied were compared in terms of the number and disposition of microhorizons, presence of oriented particles, degree of classification of particles and abundance of fine material that could be attributed to the action of the microrelief on the transport of materials and the sedimentation conditions.

Key words: Sedimentary crust, thin section, microhorizons, optical microscope, scanning electron microscope.

(1) Facultad de Ciencias. Universidad de A Coruña. A Zapateira, 15071 A Coruña, España.

(2) INRA. Unité de Science du Sol-SESCPF. Orléans. Francia.

INTRODUCCIÓN

En comparación con zonas naturales o en aquellas en las se han llevado a cabo obras de ingeniería civil, en las que los rasgos erosivos tales como las incisiones de regueros y cárcavas permanecen visibles una vez que han sido formados, la degradación de los suelos en los campos agrícolas no es tan claramente manifiesta ya que las prácticas de laboreo eliminan periódicamente estos rasgos erosivos superficiales (De ALBA *et al.*, 2003). Sin embargo, el paisaje agrícola gallego se caracteriza por la presencia generalizada de costras superficiales cuyo desarrollo y evolución está relacionado con el tipo de suelo, la precipitación, las prácticas agrícolas y la topografía del terreno.

El desarrollo de una costra es un proceso dinámico y su morfología evoluciona al ir aumentando la precipitación (CHEN *et al.*, 1980). Para poder evaluar la intensidad y/o gravedad de la degradación de la superficie del suelo es interesante identificar los diferentes tipos de costra. En este sentido, WEST *et al.* (1990) o posteriormente VALENTIN & BRESSON (1992) propusieron modelos generales que explican el desarrollo de costras superficiales. De modo general, en la dinámica de los procesos de encostrado se reconocen dos tipos fundamentales de costra, estructural y sedimentaria.

Las costras estructurales se forman "in situ" mediante procesos directamente relacionados con el impacto de las gotas de lluvia y la humectación generalmente rápida de la superficie. En ellas se han podido identificar uno o incluso más microhorizontes, que consisten en niveles

más o menos potentes (1-10 mm) con porosidad muy poco desarrollada y diámetro medio de poro inferior al del material subyacente, formadas por partículas desprendidas de los agregados por acción de la precipitación, reordenamiento de partículas, y fragmentos de agregados y elementos estructurales más o menos coalescentes. La alteración morfológica más frecuente asociada con esta capa desorganizada es la modificación del sistema poroso, y la presencia de estructuras derivadas de fenómenos de eluviación e iluviación que pueden presentarse en el interior o sobre la misma.

Generalmente, se admite que la formación de una costra estructural supone una reducción de la porosidad que oscila entre el 30 % y el 90 % de la original (PAGLIAI *et al.*, 1983; NORTON, 1987; WEST *et al.*, 1990).

Si bien, como se acaba de mencionar las costras estructurales se forman por reorganización de partículas, de tal modo que el desplazamiento de los fragmentos es mínimo y están ausentes tanto la granoclasificación como los procesos de sedimentación, la formación de costras sedimentarias se atribuye al transporte inducido por el flujo de agua y la deposición de partículas individuales y microagregados desde zonas topográficas relativamente altas a posiciones bajas del relieve.

Morfológicamente, la mayor parte de las costras sedimentarias han sido descritas como láminas o capas múltiples de partículas o microagregados que se depositan de modo discordante sobre una costra estructural o suelo no alterado (KOOISTRA & SIDERIUS, 1986; NORTON & SCHRÖEDER, 1987; BRESSON & BOIFFIN, 1990).

En cuanto a su génesis, se considera que cada lámina es consecuencia de un único episodio de lluvia y entre uno y otro se aprecian variaciones en cuanto al tamaño de grano y a la distribución granulométrica en función del microrrelieve de la superficie, las características del episodio de precipitación y las circunstancias en las que se originó el flujo que transportó estos materiales. En la mayor parte de los casos, las costras sedimentarias no presentan estructura pero han sido identificados tanto microagregados redondeados (FALAYI & BOUMA, 1975; BRESSON & BOIFFIN, 1990) como fragmentos que previamente habían formado otras costras (COURTY, 1986).

Aunque generalmente las costras sedimentarias están formadas por varias capas, algunos autores observaron costras sedimentarias con una sola capa y la atribuyeron a intensidades constantes de precipitación (FALAYI & BOUMA, 1975; ARSHAD & MERMUT, 1988; WEST *et al.*, 1990).

Las principales características observadas tras la formación de una costra sedimentaria están relacionadas con el espesor de las capas, las modificaciones de la porosidad y las características hidráulicas que difieren del material subyacente.

El espesor varía considerablemente en función de la microtopografía y las características de la sedimentación. Cuando la costra sedimentaria cubre áreas extensas, los espesores medidos oscilan entre 0,6 mm (VALENTIN & RUÍZ FIGUEROA, 1987) y 20 mm (BRESSON & BOIFFIN, 1990), aunque en general se sitúan entre 3 y 5 mm. En las depresiones depende de la profundidad de estas y frecuentemente es del orden de varios centímetros.

Dado que las costras sedimentarias, en general, no tienen estructura, los poros pueden considerarse de tipo primario, es decir, formados durante el proceso de acumulación de partículas. Su tamaño y número depende de la granulometría, y el grado de clasificación de los materiales que las originan. En muchos trabajos se ha observado que en las costras de este tipo no existen macroporos o bien que su número está muy limitado (COURTY, 1986; KOOISTRA & SIDERIUS, 1986; PAGLIAI, 1987; ARSHAD & MERMUT, 1988). En general, las costras formadas a partir de capas con granos gruesos o microagregados tienen mayor porosidad total que las formadas a partir de elementos de tamaño más fino.

VALENTIN & RUÍZ FIGUEROA (1987), observaron que las costras sedimentarias desarrolladas a partir de un suelo limo-arenoso presentaban entre un 8 y un 14 % de poros mayores que 0,075 mm, mientras que el mismo suelo no encostrado tenía un 35 % de poros superiores a 6 mm de diámetro. NORTON (1987) en superficie con surcos observó que la costra sedimentaria en las zonas de menor relieve presentaba menos del 5 % de poros mayores de 0,02 mm de diámetro, hasta la profundidad de 10 mm. También comprobaron que la costra sedimentaria tenía menos porosidad que una costra estructural formada en el mismo suelo bajo otro tipo de cultivo.

Asociados a costras sedimentarias pueden aparecer vesículas o poros circulares inmediatamente por debajo de la superficie (COURTY, 1986; KOOISTRA & SIDERIUS, 1986; VALENTIN & RUÍZ FIGUEROA, 1987). Su formación se rela-

ción con la presencia de aire atrapado en los niveles más superficiales, tras la formación de charcos de agua en períodos de precipitación intensa. Debido al agua encharcada y al pequeño tamaño de los poros de la matriz arcillosa, el desplazamiento de aire está muy limitado, siendo reemplazado en los poros por el agua que se infiltra poco a poco.

Las vesículas pueden suponer una proporción importante de la porosidad total de una costra sedimentaria. Sin embargo, como en general no hay conexión entre ellas su contribución a la transmisión de agua es prácticamente nula. Por lo tanto, la medida de estos poros ineficaces para el flujo de agua, puede enmascarar la relación entre la porosidad eficaz y la intensidad de flujo de agua a través de costras sedimentarias.

En este trabajo se efectúa la caracterización micromorfológica de dos costras sedimentarias formadas en un suelo agrícola de textura media. Dichas costras se originaron bajo la acción de la misma precipitación en dos zonas con distinto microrrelieve. Se evalúan en términos aproximados el espesor, porosidad y otras características, a partir del estudio de láminas delgadas observadas con microscopio óptico y microscopio electrónico de barrido.

MATERIAL Y MÉTODOS

Características del área estudiada

Se tomaron dos muestras de costra sedimentaria en una parcela situada en Liñares-Culleredo (A Coruña, NW España), formada sobre esquistos básicos del Complejo de Órdenes. La parcela, con

una extensión de 0.296 ha, forma parte de una explotación tradicional dedicada a maíz desde 1997, como único cultivo anual, permaneciendo el resto del año el suelo a barbecho.

Muestreo y preparación de láminas delgadas

El muestreo se realizó en invierno a finales del mes de enero de 2000. La parcela se encontraba a barbecho desde el otoño anterior, después de haber efectuado un pase de fresa tras la recolección del maíz.

Las muestras se tomaron en cajas Kubiena, en una zona de cabecera labrada a favor de la máxima pendiente (Li1) y en una zona de topografía llana entre las líneas de fresado (Li3). Se prepararon láminas delgadas siguiendo el protocolo del INRA de Orleans-Francia (Le LAY, 1997), y se observaron al microscopio óptico y microscopio electrónico de barrido (MEB). A partir de las láminas delgadas, se realizaron descripciones generales referidas a la zona alterada y al material subyacente.

La descripción se efectuó en base a características tales como presencia o ausencia de costra, número y espesor de las bandas, abundancia tipo y forma de los poros, así como tamaño, orientación y disposición de las partículas. También se tuvieron en cuenta la existencia de zonas de transición tanto entre bandas como entre zona de costra y material subyacente y disposición del material en ambas zonas. Así mismo se efectúan comparaciones atendiendo a la presencia de diferencias mineralógicas, cambios de color del material y, sobre todo, diferencias de porosidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados de la observación de láminas delgadas con microscopio óptico y microscopio electrónico de barrido en dos muestras procedentes de la parcela de Liñares (Li1 y Li3). La formación de costras sedimentarias e incluso aparición de regueros es habitual en esta parcela. En trabajos previos se han descrito estos fenómenos (VALCÁRCEL, 1999; TABOADA CASTRO, 2001) bajo diferentes condiciones de laboreo durante los años 1997-2000.

Descripción agronómica y estado de evolución de la parcela

La parcela de Liñares fue fresada en noviembre de 1999. Esta labor originó un importante microrrelieve pero no desmenuzó totalmente el suelo ni los restos de las cañas de maíz. La precipitación acumulada entre el laboreo del suelo (noviembre de 1999) y la toma de muestra (27 de enero de 2000) fue de 217.7 mm. La superficie del suelo había evolucionado notablemente desde el estado inicial, de modo que la costra sedimentaria se había extendido desde las primeras hondonadas en que se observó y en donde también presentaba mayor espesor, a más del 90% de la superficie de la parcela.

La muestra Li1 procedía de una zona con una pendiente fuerte, de aproximadamente 19-20 %, que correspondía con la cabecera de la parcela, y además, estaba labrada en la dirección de la máxima pendiente. En consecuencia, en esta área predominaba la erosión y se formaron pequeños regueros; no obstante, a favor de la

microtopografía se observaron zonas alternas de erosión y de sedimentación. La muestra Li1 se tomó sobre una pequeña hondonada local que contenía materiales arrastrados no sólo desde el entorno inmediato (centimétrico) sino también de distancias métricas y tal vez decamétricas.

La muestra Li3 se tomó en una zona localizada entre los surcos de fresa en la que la costra sedimentaria también presentaba un espesor notable. En este caso los materiales que formaron la costra procedían en su mayor parte de distancias de pocos decímetros.

Caracterización de las costras sedimentarias

En la figura 1 se presentan fotografías a tamaño natural de una sección pulida de las muestras Li1 y Li3, pudiendo apreciarse el importante espesor de la costra sedimentaria (mayor de 1.5 cm en ambas). A esta escala, en Li1 se reconocen detalles como la presencia de un fragmento vegetal en la base de la zona encostrada y una grava de dimensiones centimétricas que ocupa la zona central del material subyacente a la costra; además en la base de Li1 se observa una mayor abundancia de materiales finos y plasma que en capas más recientes de la misma. El aspecto fluidal de la sección pulida de esta muestra es muy aparente, indicando que procede de una zona en donde se estaba produciendo arrastre de materiales. En Li3 se observan un mayor número de bandas que presentan mayor horizontalidad que en Li1.

Las observaciones con microscopio óptico y electrónico de láminas delgadas de la muestra Li1 permitieron diferenciar

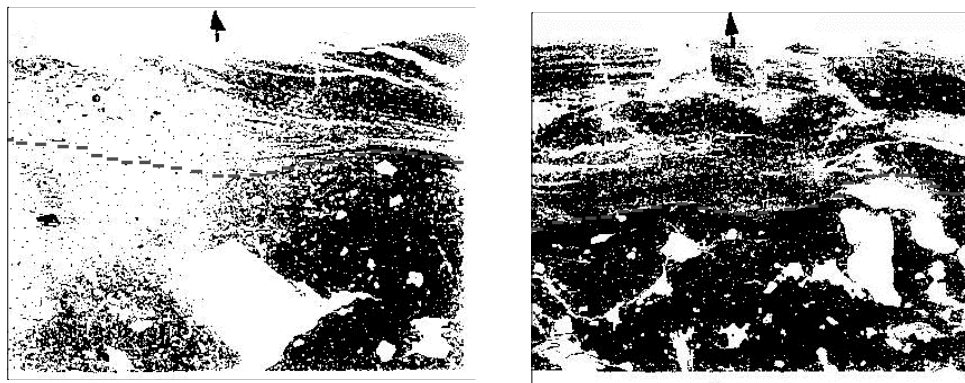


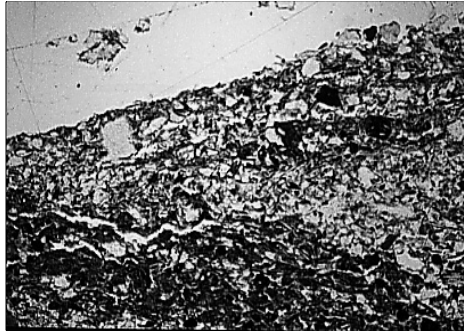
Figura 1. Sección pulida de láminas delgadas de las muestras Li1 (izquierda) y Li3 (derecha) a tamaño natural.

con claridad al menos cuatro bandas sedimentarias, que posiblemente sean consecuencia de la sedimentación de materiales durante otros tantos episodios importantes de lluvia; además en algunas zonas del transecto vertical parece que se individualizan otras bandas, más difíciles de diferenciar, que se formarían como consecuencia de episodios menores, que originarían fenómenos de arrastre también más limitado (figuras 2 y 4). En las cuatro bandas más importantes se aprecia con frecuencia granoselección y al mismo tiempo los sucesivos microhorizontes buzan siguiendo la dirección de la pendiente. También se observó una diferenciación entre la zona encostrada y el material subyacente que se presenta homogéneo (figura 3) y en el que aumenta de modo significativo el número y el tamaño de los poros, como se describe más detalladamente a continuación.

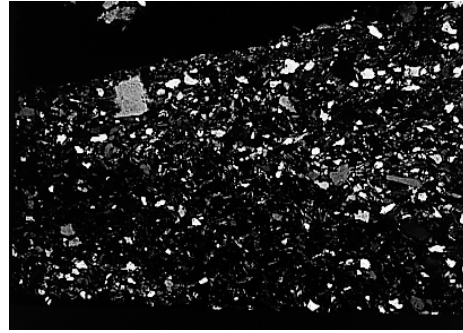
En la figura 2, se presentan microfotografías al microscopio óptico con luz normal y polarizada de tres zonas de la costra de la muestra Li1, que corresponden a la

superficie (a y b), el interior (c y d) y la parte inferior de la costra (e y f) y en la figura 3 se puede apreciar el material subyacente a la costra. Con luz polarizada los granos minerales tienen colores claros, los agregados oscuros y los poros grisáceos; el contraste entre microfotografías tomadas con luz normal y luz polarizada, permite diferenciar mejor estos tres elementos. Al comparar ambas fotografías se comprueba el contraste entre las mayores dimensiones de las partículas de la costra y la zona del material subyacente. La estructura del material subyacente permaneció relativamente inalterada y la costra está caracterizada por el colapso de la estructura original y la presencia de fragmentos de menores dimensiones.

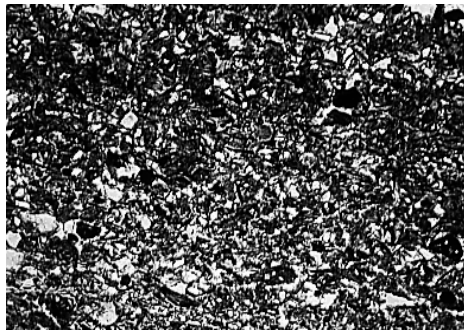
Comparando las figuras 2 y 3 también se observan ya diferencias en cuanto a la importancia que cobra la porosidad en la capa sedimentaria y el material subyacente, como consecuencia del empaquetamiento más denso de las partículas que constituyen la costra.



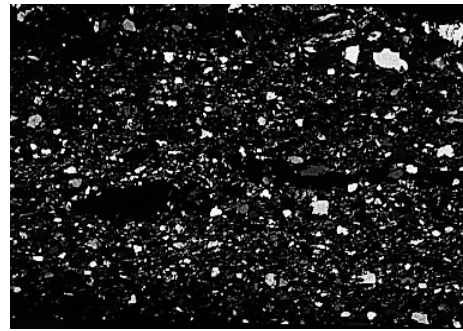
a) Superficie, luz normal



b) Superficie, luz polarizada



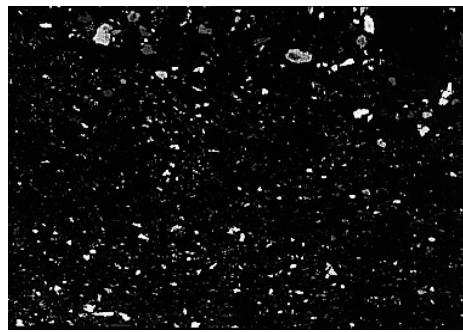
c) Interior, luz normal



d) Interior, luz polarizada



e) Base, luz normal



f) Base, luz polarizada

Figura 2. Secciones de la muestra Li1 al microscopio óptico con luz normal y luz polarizada, que corresponden a la superficie, el centro y la base de la costra.

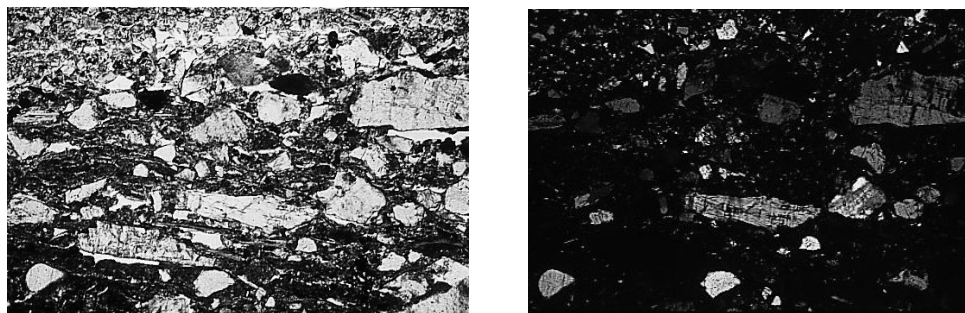


Figura 3. Secciones de la muestra Li1 al microscopio óptico con luz normal y luz polarizada, que corresponden al material subyacente.

Para el estudio con el microscopio electrónico de barrido, se tomaron en primer lugar secuencias de microfotografías a 30 aumentos desde la superficie hasta el material subyacente; a continuación se tomaron imágenes con mayores aumentos, lo que permitió comparar la morfología de la costra sedimentaria y el material subyacente no alterado.

En la figura 4 se presenta un transecto formado por superposición de sucesivas microfotografías al microscopio electrónico de barrido a 30 aumentos, con un espesor total superior a los 15 mm. Este transecto permite apreciar las cuatro bandas principales, orientadas en el sentido de la pendiente, y que se diferencian entre sí por el color y localmente por la granoselección; la orientación resulta particularmente evidente por la disposición de los minerales que se presentan en laminillas. Vista en conjunto, se aprecian en la costra discontinuidades y oscilaciones en cuanto al tamaño de grano y la distribución granulométrica, que deben de estar relacionadas con los episodios de precipitación y carac-

terísticas del flujo que aportó los materiales sedimentarios y las interacciones de los mismos con el microrrelieve.

La banda más próxima a la superficie está formada por partículas relativamente grandes, con tamaños que oscilan predominantemente de 0.1 a 0.2 mm, pero que pueden alcanzar hasta 0.5 mm a lo largo del eje mayor. Por tanto, se aprecia cierta selección por diámetros de partículas frecuentemente angulares o subangulares, de modo que se diferencia de las bandas vecinas por la menor abundancia de materiales laminares. En la figura 5 (a y b) se puede observar con más detalle (x121) la disposición de las partículas en esta capa. El límite entre la primera y la segunda banda tiene una inclinación importante, mayor de 30°. El color de esta banda es más claro que el de la inmediatamente inferior, lo que se debe a que el plasma es muy poco abundante y las partículas, en una mayor parte de naturaleza mineral, son de colores claros. La orientación del material es caótica. La porosidad es muy baja, inferior al 10% y predominan los poros de forma redondeada.

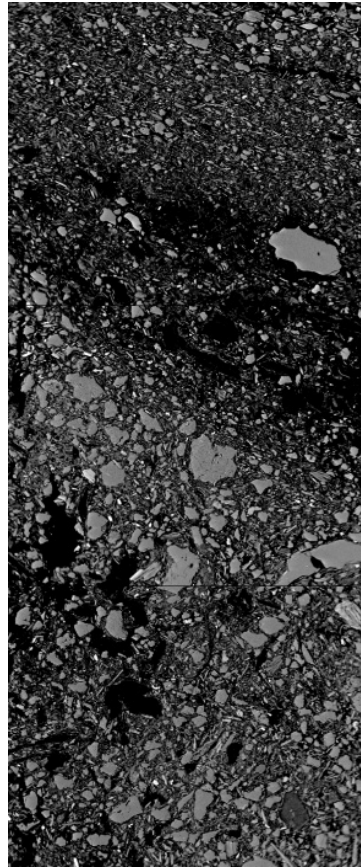
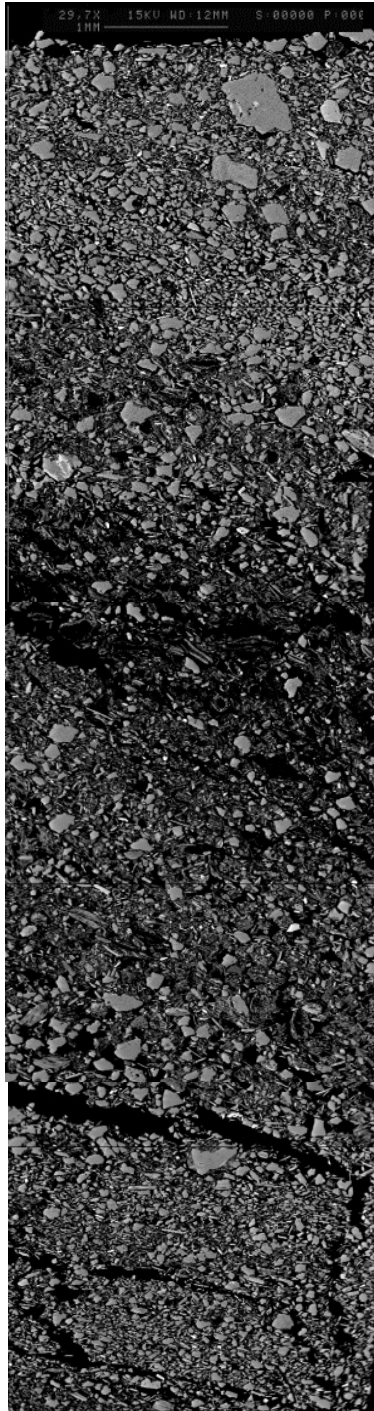
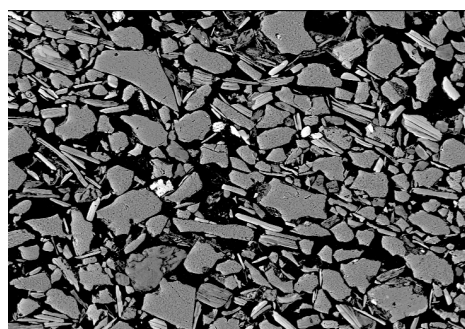


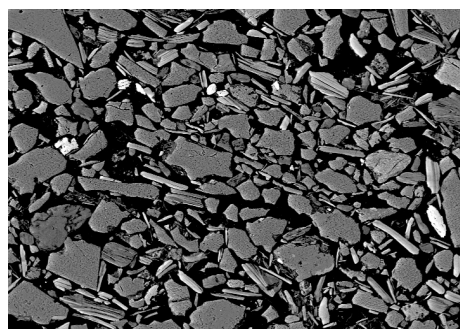
Figura 4. Microhorizontes en un transecto de la costra sedimentaria de Li1 al MEB (x 30).

La segunda banda está formada por partículas de menor tamaño y mejor clasificadas que las de la banda de la superficie. No se aprecia una zona de transición brusca con un límite claro entre esta banda y las vecinas; aunque está separada de la tercera por una capa de partículas similares en aspecto y tamaño a las de la primera capa. Por tanto, la segunda banda se presenta como una formación aproximadamente simétrica, en cuya parte central el plasma es relativamente más abundante y los fragmentos menos frecuentes. En conjunto, la

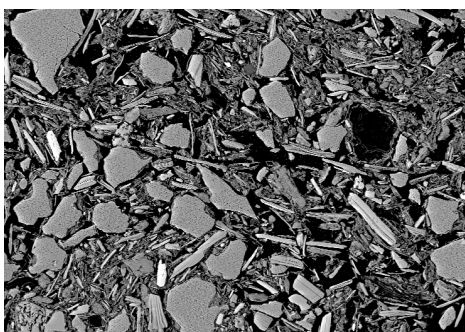
segunda capa presenta un color más oscuro que la primera y la tercera lo que se puede atribuir a que el plasma es más abundante en ella que en las dos vecinas. El aspecto de las partículas de esta capa a mayores aumentos (x121) se puede observar en dos microfotografías (figura 5 c y d) apreciándose como partículas con diferentes aspectos que contrastan entre sí, subredondeadas y laminares se encuentran superpuestas unas a otras; el contraste es mayor dado que las formas laminares tienden a presentar una orientación preferencial.



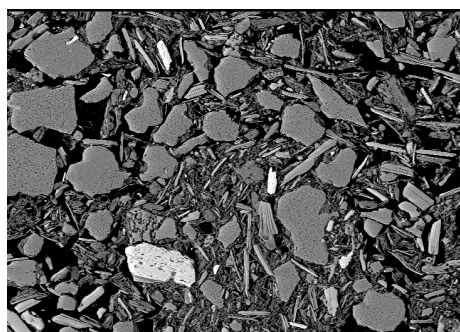
a) Primera banda (x 121)



b) Primera banda (x 121)



c) Segunda banda (x 121)



d) Segunda banda (x 121)

Figura 5. Microfotografías con detalles de la costra sedimentaria y del material subyacente de la costra sedimentaria de la lámina delgada Li1.

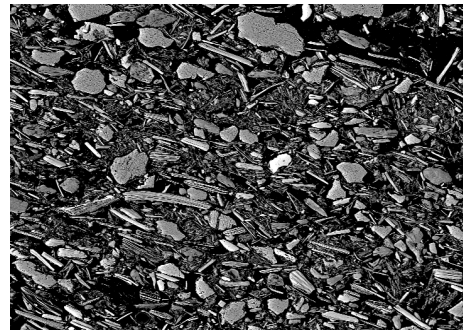
La tercera banda está bien definida por el color más claro que la hace destacar sobre el conjunto de la costra. El tamaño de partícula es muy heterogéneo y los materiales de mayores dimensiones, de hasta 250-300 μm a lo largo del eje principal, presentan un aspecto similar a los de la primera capa, en la superficie de la costra. Los fragmentos de agregados y partículas están superpuestas unas en relación a otras, siendo notable la orientación de los elementos laminares. La transición de la banda subyacente de color más oscu-

ro es brusca, con un límite neto entre ambos. Una particularidad de la tercera banda es el desarrollo de poros alargados y estrechos, que se aprecian en sección longitudinal y transversal, con diámetros en general inferiores a 100 μm , que se comunican entre ellos.

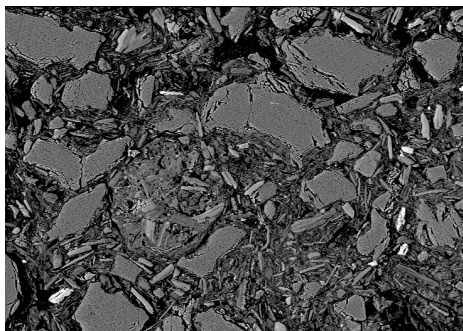
La cuarta banda, situada justo por encima del material subyacente es una zona relativamente ancha, bien delimitada y de color más oscuro que los restantes; debido a la mayor abundancia de plasma. Se aprecia como una microformación bien delimi-



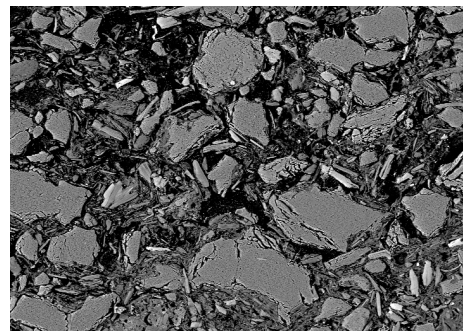
e) Cuarta banda (x 121)



f) Cuarta banda (x 121)



g) Material subyacente (x 121)



h) Material subyacente (x 121)

Figura 5. Continuación.

tada de las bandas suprayacentes y el material subyacente. Las partículas esféricas son de pequeñas dimensiones en relación con otras capas, generalmente menores de 100 μm . Las partículas laminares, relativamente abundantes y menores que las laminillas similares de otras bandas, presentan una clara orientación y están superpuestas, como se aprecia en la figura 5 (e y f) en donde se presentan microfotografías de la cuarta banda a 121 aumentos. En conjunto, este microhorizonte tiene aspecto de masa compacta formada por fragmentos y partículas relativamente pequeñas ensambladas por plasma en los que apenas se observan poros.

El material subyacente de la muestra Li1 limita con la cuarta banda, en la base de la costra por una zona de transición estrecha y discontinua, que puede representar el vestigio de una costra estructural, anterior al aporte de materiales alóctonos que constituyen la costra sedimentaria formada por las cuatro bandas principales antes descritas. Entre la banda inferior de la costra y el material subyacente no hay un verdadero cambio de color, pero en este último se aprecian partículas de grandes dimensiones mayores de 500 μm que son relativamente abundantes y le confieren más claridad. El material subyacente de tamaño muy heterogéneo presenta partículas más o menos angulares, subangulares y laminares de tamaño superior al de los que constituyen las sucesivas bandas de la costra.

En el material subyacente ya se aprecia cierta proporción de plasma que se encuentra enlazando y cementando estas partículas. También queda patente un sistema de poros en general redondeados con dimensiones con frecuencia mayores de

100 μm . En la figura 5 (g y h) se pueden apreciar a 121 aumentos las características de la masa subyacente.

Al observar otros transectos de la lámina Li1 se comprobó la presencia de las cuatro bandas que componen la costra, con un espesor que varía en relación al transecto antes descrito; si bien localmente podía presentar oscilaciones sobre el patrón general, la organización antes descrita se mantiene relativamente uniforme.

En síntesis, la costra Li1, se caracteriza por la segregación del material que la constituye en diferentes bandas, que se distinguen entre sí por la heterogeneidad de las partículas en cuanto a la forma y el tamaño. El espesor de estas bandas no es constante y buzan más de 30°, las partículas laminares muestran orientación. En general la porosidad es muy baja, si bien se observan notables variaciones entre bandas. De forma aislada se observan poros que no suelen superar 100 μm de diámetro. Los poros apreciados son más abundantes en la tercera banda, tienen disposición longitudinal y están comunicados entre sí. En el transecto estudiado no se observan restos vegetales.

Un transecto de la muestra Li3 formado por superposición de una serie de microfotografías al microscopio electrónico de barrido a 30 aumentos se presenta en la figura 6. En este caso el espesor del transecto incluyendo costra y material subyacente es mayor de 20 μm . La principal diferencia del transecto de la muestra Li3 (figura 6) al compararlo con el de Li1 (figura 4) estriba en la disposición prácticamente horizontal de las bandas sucesivas, lo que está de acuerdo con el hecho de que en este caso la muestra se tomó en una

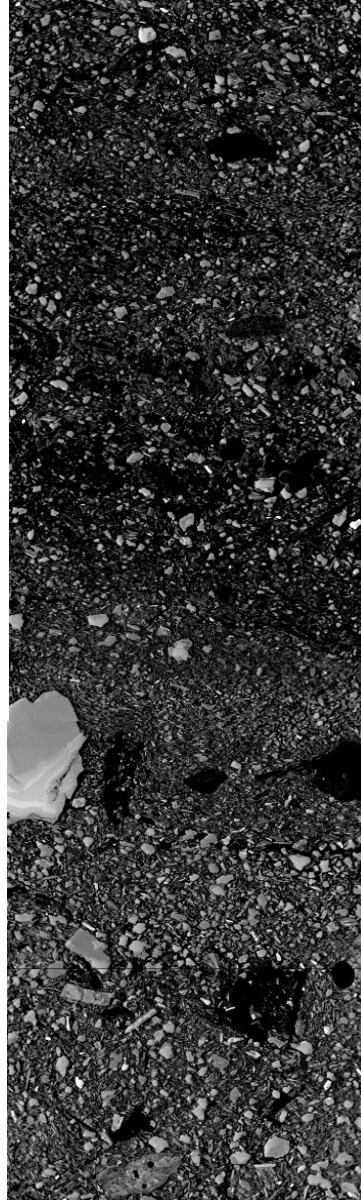
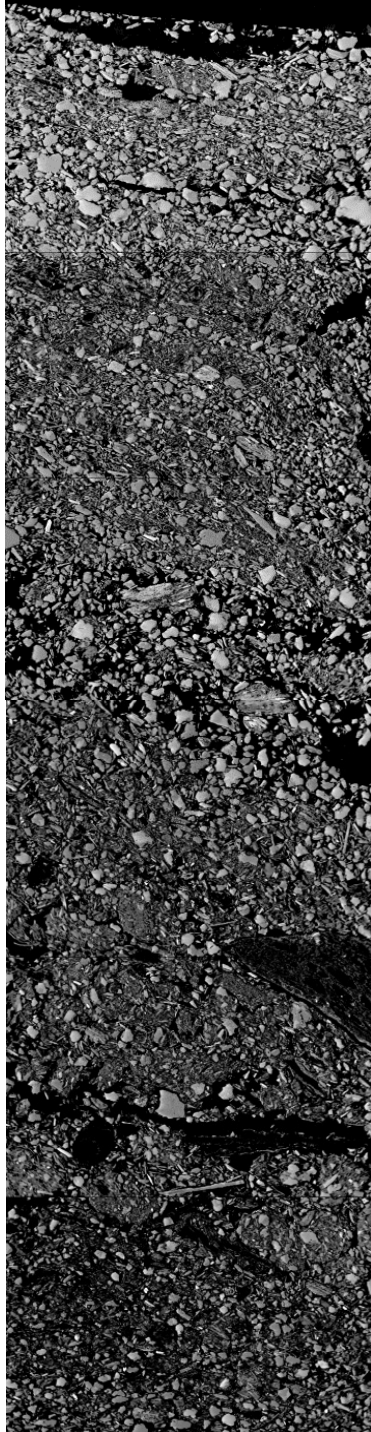


Figura 6. Microhorizontes en un transecto de la costra sedimentaria de Li3 al MEB (x 30).

zona entre regueros, con una microtopografía local prácticamente llana. Las partículas desprendidas en esta zona entre regueros se desplazaban tanto por salpicadura como por flujo laminar que finalmente se concentra a favor de surcos de fresadora labrados perpendicularmente a la dirección de la máxima pendiente.

En la lámina delgada Li3 se pudieron apreciar un mayor número de bandas, que en la muestra Li1, ocho en total, por lo que no resulta sencillo establecer una correlación entre ambas costras sedimentarias. Los materiales que forman la costra en esta muestra, deben de proceder del entorno centimétrico y decimétrico, dada su localización topográfica.

En la banda de la superficie de Li3, predominan las partículas esferoidales relativamente grandes de hasta 0.250 μm , que recuerdan a las de la misma capa de Li1. Sin embargo, lo que realmente cabe destacar de esta banda son las láminas secundarias, menos potentes, de modo que capas formadas por partículas de mayores dimensiones alternan con otras formadas por materiales más finos y con plasma mucho más abundante. En estas últimas capas se aprecian pequeñas partículas planares orientadas. Sin embargo, la orientación de los minerales no resulta muy patente. En esta banda se aprecian poros de forma esferoidal poco abundantes y con un diámetro de hasta 0.1 μm . El espesor de las bandas ricas en plasma no es constante, pero aproximadamente es del orden de 80 a 160 μm .

La segunda banda está formada por partículas gruesas y bien individualizadas, con una ausencia prácticamente total de plasma y en consecuencia una porosidad

elevada. Las partículas predominantes están constituidas por cuarzo de forma más o menos esferoidal y fragmentos esquistoides que tienden a presentar formas laminares. No existe una orientación preferencial de modo que la deposición de las partículas que constituyen esta lámina ocurriría en ausencia de una dirección de flujo preferencial.

La tercera banda es de color más oscuro que la anterior; en cuanto al tamaño de las partículas las de mayor calibre son similares a las de la segunda capa pero están inmersas en un material laminar que forma estructura a modo de filamentos. Así mismo, los poros son menos abundantes que en la capa anterior, siendo de destacar que no todos los poros son de forma redondeada sino que también hay poros comunicantes que presentan aspecto planar en corte transversal.

La cuarta y la quinta banda presentan cada vez material más fino. En el caso de la cuarta banda se aprecia que está formada por partículas superpuestas unas encima de otras de forma diversa. Como consecuencia disminuye sensiblemente la porosidad en relación a la de las capas suprayacentes llegando incluso a ser prácticamente inapreciable.

Sin embargo, la quinta banda se presenta como bien delimitada, en donde se observa el material más fino de todo el transecto por lo que se puede afirmar que la porosidad es prácticamente nula. Esta capa es, en conjunto, muy homogénea, con finas partículas superpuestas unas a otras, si bien se puede observar en la parte superior de la misma una lámina secundaria, que se reconoce por su color ligeramente más oscuro.

En la sexta banda, se invierte la tendencia en cuanto a disminución del tamaño de las partículas, de modo que presenta unas características similares a las de la cuarta banda. Las partículas presentan tamaños intermedios entre los de la banda quinta y los de las bandas más superficiales; la porosidad apenas es perceptible. La séptima banda tiene menor potencia que las anteriores y está formada también por materiales finos. La octava banda, menos delimitada que las anteriores y relativamente potente se considera una zona de transición con el material subyacente.

Por último, el material subyacente está formado por partículas de tamaños y forma muy heterogéneos, de modo que se aprecian partículas grandes constituidas por agregados o granos minerales que se encuentran rodeados o cementados por otros de dimensiones más pequeñas, algunos de los cuales proceden de fragmentos de agregados. La porosidad aumenta sensiblemente en relación a la de las zonas superiores. Por tanto, esta capa subyacente está caracterizada ya por una cierta desorganización de los elementos estructurales en relación a lo que debió de constituir la estructura del suelo inicial. A pesar de ello, la porosidad de la misma es sensiblemente más elevada que la de las bandas que forman la costra sedimentaria.

Comparación entre costras sedimentarias

Para interpretar en términos aproximados la génesis de estas costras hay que tener en cuenta como señalan WEST *et al.* (1990) la conveniencia de haber efectuado observaciones en diferentes esta-

dios de desarrollo de las mismas y no sólo al final de una serie de episodios acumulativos de precipitación, como es el caso en las láminas delgadas estudiadas. Las dos costras sedimentarias observadas, presentan una secuencia sucesiva de bandas, en algunas de las cuales a su vez se aprecian diversas capas o lechos de partículas, de modo que recuerdan a las descritas previamente por diversos autores (KOOISTRA & SIDERIUS, 1986; BRESSON & BOIFFIN, 1990, etc).

Por otro lado, si se comparan las muestras Li1 y Li3, se constata la dificultad de efectuar una correlación de las capas observadas en las mismas. Esto pone de manifiesto la importante variabilidad de la morfología de transectos en el interior de una misma parcela. Dicha variabilidad debe de ser atribuida a la acción del microrelieve sobre el transporte de materiales y las condiciones de sedimentación.

Las semejanzas de la costra en las dos muestras tomadas sobre esquisto son más bien limitadas; aunque se hayan formado bajo la acción de la misma cantidad de precipitación. Ambas tienen una potencia similar del orden de 1.5 a 2 cm y están formadas por capas múltiples que se depositan de modo discordante sobre suelo no alterado, sin embargo no se diferencian el mismo número de capas principales en cada una de ellas. Aunque no fue posible correlacionar las sucesivas bandas de las costras, el análisis de las diferencias entre las mismas puede ser útil para efectuar inferencias acerca de las condiciones de formación. Las principales diferencias entre Li1 y Li3 se observaron en cuanto a la disposición de las bandas, la presencia de partículas orientadas, el grado de clasi-

ficación y la abundancia de material fino. El contraste entre la disposición inclinada de las bandas en Li1 y la horizontalidad de las mismas en Li3 sugiere ya que en la primera muestra los fenómenos de transporte simultáneos a la formación de costra pudieron ser importantes. El buzamiento de Li1 y su menor espesor total debe de estar relacionado con la fuerte pendiente de la zona de cabecera en que se tomó la muestra; por el contrario Li3 procede de una hondanada local de un área entre los surcos. En consecuencia los fenómenos de transporte en la primera costra afectan al conjunto de la ladera a escala decamétrica y en el segundo caso están muy localizadas y limitadas a escala centimétrica y decimétrica.

En la mayor parte de las principales bandas de la muestra Li1 se aprecia claramente la orientación de materiales laminares; sin embargo, en Li3 esta orientación no es tan patente o no se aprecia en absoluto. La presencia de partículas orientadas se asocia con la translocación lateral de material fino durante el desarrollo de la costra (TARCHITZKT *et al.*, 1984; WEST *et al.*, 1990). Aunque puede ser consecuencia también de la deposición en la base de microdepresiones una vez que ha cesado la precipitación. No obstante, el volumen que ocupa el agua en las microdepresiones no permite explicar la formación de bandas de más de 1 mm de espesor con laminillas orientadas. En consecuencia, al menos en la muestra Li1 tomada en una zona de ladera, cabe atribuir la orientación de las laminillas a un transporte de materiales simultáneo de la formación de la costra a favor de la lámina de agua que se desliza por la superficie.

En general, los materiales que forman las sucesivas bandas de la muestra Li1 están mejor clasificados que los de las bandas de Li3. Se puede considerar que la primera banda de ambas muestras en la que predominan las partículas esferoidales más o menos orientadas, es una excepción. Por otra parte en el interior de la costra Li3 se observan bandas muy ricas en elementos finos y plasma claramente diferenciados y con una potencia tal que no encuentran paralelismo en la costra Li1. Otros autores (BRESSON & BOIFFIN, 1990) han observado que las partículas de los depósitos iniciales de una costra sedimentaria formada entre terrones están poco diferenciados. En la posición topográfica que ocupaba la muestra Li3, desplazamientos de lodo a pequeñas distancias, como consecuencia de la desagregación inicial de los terrones pueden haber originado niveles relativamente ricos en materiales finos.

De la discusión anterior se infiere que las condiciones climáticas durante la sedimentación que originaron las costras Li1 y Li3 debieron de ser muy diferentes. En la formación de la costra Li1 parece que fueron importantes los fenómenos de eluviación y desplazamiento lateral de materiales, asociados al flujo de una lámina superficial de agua, sin iluviación en profundidad. Por el contrario, en la génesis de algunas de las bandas de la costra Li3 parece que intervinieron translocaciones de material a escala local, dentro de la microdepresión en que se formó.

Los transectos estudiados han puesto de manifiesto que la formación de una sola banda que compone una costra estructural supondrá una reducción drástica de la velocidad de infiltración, dado que la

porosidad se ve reducida por debajo de umbrales limitantes para permitir el desplazamiento de agua hacia el interior del perfil, en este sentido, las vesículas o poros de hasta 100 μ m observadas en algunas bandas están relacionadas con la presencia de aire atrapado (KOOISTRA & SIDERIUS, 1986). Sin embargo, debido a su disposición transversal a la sección de la costra, su contribución a la infiltración de agua se considera prácticamente nula.

CONCLUSIONES

El estudio micromorfológico de costras sedimentarias formadas en la superficie de suelos sobre esquisto puso de manifiesto que el espesor de las mismas era del orden de 1.5 a 2 cm y que estaban constituidas por múltiples capas, cuyos sistemas porosos apenas son perceptibles o están muy poco desarrollados, que se depositaron

como consecuencia de sucesivos acontecimientos erosivos sobre un material subyacente con porosidad bien desarrollada. Así mismo, se puso de manifiesto una importante variabilidad espacial de la morfología de las costras sedimentarias de acuerdo con las características del microrrelieve.

AGRADECIMIENTOS

A la Fundación Caixa-Galicia por la concesión de una beca de "Formación de Personal Investigador en Francia" a la primera autora para realizar una estancia en el INRA (Unité de Science du Sol-SESCPF) de Orleáns (Francia), y a este centro por su acogida en sus laboratorios.

Recibido: 09-VI-03

Aceptado: 30-VII-03

BIBLIOGRAFÍA

- ARSHAD, M. A. & MERMUT, A. R. (1988). Micromorphological and physico-chemical characteristics of soil crust types in northwestern Alberta, Canada. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52: 724-729.
- BOIFFIN, J. & BRESSON, L. M. (1987). Dynamique de formation des croûtes superficielles: apport de l'analyse microscopique. In: *Micromorphologie des sols/Soil micromorphology*. Fedoroff, N., Bresson, L. M., Courty, M. A. (Eds.). Association Française pour l'Etude du Sol. Plaisir. Paris. France, pp.: 393-399.
- BRESSON, L. M. & BOIFFIN, J. (1990). Morphological characterization of soil crust development stages on an experimental field. *Geoderma*, 47: 301-325.
- CHEN, Y.; TARCHITZKY, J.; BROUWER, J.; MORIN, J. & BANIN, A. (1980). Scanning electron microscope observations on soil crust and their formation. *Soil Sci.*, 130: 49-55.
- COURTY, M. A. (1986). Morphology and genesis of soil surface crust in semi-arid conditions (Hissar region, northwest India). In: *Assessment of soil surface sealing and crusting*. Callebaut, F.; Gabriels, D. & de Boodt, M. (Eds.). Flanders Research Centre for Soil Erosion and Soil Conservation. Ghent, Belgium, pp.: 32-39.
- De ALBA, S.; BENITO, G.; PÉREZ GONZÁLEZ, A. & LACASTA, C. (2003). Erosión hídrica en sistemas de agricultura extensiva de clima mediterráneo. Influencia del manejo del suelo en Castilla-La Mancha. En: *Control de la Erosión y Degradación del Suelo*. R. Bienes & M. J. Marqués (eds). Forum Calidad. Madrid, pp.: 71-74.
- FALAYI, O. & BOUMA, J. (1975). Relationships between the hydraulic conductance of surface crust and soil management in a typical Hapludalf. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 39: 957-963.
- KOOISTRA, M. J. & SIDERIUS, W. (1986). Micromorphological aspects of crust formation in a agricultural soil under savanna climate. In: *Assessment of soil surface sealing and crusting*. Callebaut, F.; Gabriels, D. & de Boodt, M. (Eds.). Flanders Research Centre for Soil Erosion and Soil Conservation. Ghent. Belgium pp.: 9-17.
- Le LAY, C. (1997). *Fabrication des lames minces de sol. Fiche de protocole*. INRA. Unité de Science du Sol- SESCPF. Orleáns. Francia.
- NORTON, L. D. (1987). Micromorphological study of surface seals developed under simulated rainfall. *Geoderma*, 40: 127-140.
- NORTON, L. D. & SCHROEDER, S. L. (1987). The effect of various cultivation methods on soil loss: a micromorphological approach. In: *Soil micromorphology*. Fedoroff, N.; Bresson, L. M. & Courty, M. A. (Eds.). L'Association Française pour l'Etude du sol. Plaisir, France, pp.: 431-436.
- PAGLIAI, M. (1987). Effects of different management practices on soil structure and surface crusting. In: *Soil micromorphology*. Fedoroff, N.; Bresson, L. M. & Courty, M. A. (Eds.). Association Française pour l'étude du Sol. Plaisir. France, pp.: 425-431.
- PAGLIAI, M.; BIRD, E. B. A. & LEDIN, S. (1983). Changes in surface structure (crusting). In: *Soil micromorphology*. Fedoroff, N., Bresson L. M., Courty, M. A. (Eds.). Association Française pour l'étude du Sol. Plaisir. France, pp.: 415-421.
- TABOADA CASTRO, M. M. (2001). *Morfología de superficies cultivadas en relación con la infiltración, la formación del excedente de agua y la erosión*. Tesis Doctoral. Universidad de A Coruña, 541 pp.
- TARCHITZKY, J.; BANNIN, A.; MORIN, J. & CHEN, Y. (1984). Nature, formation and effects of soil crust formed by water drop impact. *Geoderma*, 33: 135-155.
- VALCÁRCEL ARMESTO, M. (1999). *Variabilidad espacial e temporal da erosión en solos de cultivo*. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela, 266 pp.
- VALENTIN, C. & BRESSON, L. M. 1992. Soil crust morphology and forming processes in loamy and sandy soils. *Geoderma*, 55: 225-245.
- VALENTIN, C. & RUÍZ FIGUEROA, J. F. (1987). Effects of kinetic energy and water application rate on the development of crust in a fine sandy loam soil using sprinkling irrigation and rainfall simulation. In: *Soil micromorphology*. Fedoroff, N. (Ed.). France, pp.: 401-408.
- WEST, L. T.; BRADFORD, J. M. & NORTON, L. D. (1990). Crust morphology and infiltrability in surface soils from the southeast and midwest U.S.A. In: *Soil micromorphology: a basic and applied science*. Douglas, L. A. (Ed.). Developments in Soil Science, 19. Elsevier, Amsterdam, pp.: 107-113.