

CONTRIBUCIÓN DE SURCOS Y CÁRCAVAS EFÍMERAS A LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS Y FÓSFORO EN UNA CUENCA AGROFORESTAL

M.L. Rodríguez-Blanco, M.M. Taboada-Castro, M.T. Taboada-Castro

Facultad de Ciencias, Universidad de A Coruña, A Zapateira, 15071 A Coruña, España.
teresat@udc.es

Resumen. Se estudia la evolución de las concentraciones de sedimentos en suspensión (SS) y fósforo particulado (PP) y disuelto (PD), durante cuatro eventos de escorrentía, en un pequeño arroyo de cabecera que drena una cuenca agroforestal (NO de España). Tanto los SS como el PP y PD se incrementan durante los eventos, registrándose las máximas concentraciones antes que el pico de caudal excepto las del PD, que se obtienen una vez pasado éste, probablemente asociadas al flujo subsuperficial.

El PP, que representa más del 80% del total, mostró una correlación significativa con los SS en todos los eventos. Tanto las concentraciones máximas, como la carga de SS y PP, mostraron acusadas diferencias entre eventos. Los SS exportados oscilaron entre 19,66 y 483,23 kg/km², mientras que el PP varió entre 0,03 y 0,41 kg/km². Los surcos y cárcavas efímeras desarrolladas en zonas de cultivo constituyeron la principal fuente de sedimentos aportados al arroyo.

Palabras clave: sedimentos en suspensión, fósforo, exportación, eventos, erosión, cuenca agroforestal.

Abstract. This work examines the evolution of the concentrations of sediment suspension (SS) and particulate (PP) and dissolved phosphorus (PD) during four runoff events in a small stream that drains an agroforestry catchment (NW Spain). Both the SS, as the PP and DP were increase during the events. The highest concentrations were reached before the flow peak, excluding DP concentrations that were obtained after the flow peak probably associated with the subsurface flow.

The PP, which represents more than 80% of total, showed a significant correlation with SS in all events. Suspended sediment and PP maximum concentrations as well as SS and PP load showed marked differences between events. Suspended sediment exported ranged between 19.66 and 483.23 kg/km², while the PP varied between 0.03 and 0.41 kg/km². Rills and ephemeral gullies developed in cultivated land were the main sources of sediment delivered to the stream.

Key Words: suspended sediment, phosphorus, exportation, events, erosion, agroforestry catchment.

INTRODUCCIÓN

La erosión es el principal proceso de degradación de los suelos. El efecto de la erosión es doble por la pérdida de la capacidad productiva del suelo y la dispersión del sedimento, reconocido como uno de los peores contaminantes. El sedimento lleva adsorbidos numerosos compuestos, desde nutrientes como el P y el nitrógeno hasta metales y plaguicidas con posibles efectos nocivos para los sistemas acuáticos (Kronvang et al., 2002).

Los sedimentos y P aportados a un curso fluvial dependen de diversos factores, unos relacionados con el área fuente, como tipo de suelo, cosecha, manejo realizado, etc., mientras que otros se encuentran asociados a su transporte, básicamente relacionados con aspectos climáticos e hidrológicos (Scanlon et al., 2004). El primer paso en la transferencia del P desde el suelo a las aguas circundantes es su desorción, disolución o remoción, a lo que sigue su transporte a través de la escorrentía superficial o del lavado profundo.

La cantidad de P que puede perderse del suelo depende, en gran parte, del estado del P potencialmente móvil, es decir, el PD y el PP. En lo que respecta al PP, la mayor parte procede de los procesos de erosión del suelo superficial o de la erosión del suelo en los canales de drenaje. Durante el movimiento y transporte de las partículas erosionadas se tienden a seleccionar las fracciones más finas, lo que se traduce en la erosión selectiva de partículas con alta capacidad de sorción y con elevado contenido en P, normalmente superior al que presentan los suelos originales (Haygarth y Jarvis, 1999).

Los momentos de mayor riesgo de pérdida serán cuando coinciden las mayores posibilidades de pérdida en el área fuente con las generadas con causas climáticas (Sharpley y Tunney, 2000). La intensificación de la agricultura da lugar a altos contenidos de P en el suelo. Una pequeña transferencia de este elemento desde los terrenos agrícolas a las aguas circulantes puede ocasionar su eutrofización.

A escala de cuenca la exportación de P desde fuentes difusas es generalmente baja en condiciones de flujo base contrariamente a lo que suele ocurrir durante eventos tormentosos (Correll et al., 1999; Evans y Johnes, 2004).

El objetivo de este trabajo reside en estudiar la evolución de las concentraciones de SS y P (particulado y disuelto) en un pequeño arroyo de cabecera durante cuatro eventos de escorrentía, con el fin de conocer la exportación de dichos materiales en el cierre de una cuenca agroforestal.

MATERIAL Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en la cuenca del río Corbeira, situada en la cabecera del río Mero (A Coruña, NO España). Se asienta sobre esquistos básicos del Complejo de Órdenes (Martínez et al., 1984) siendo los suelos más abundantes Umbrisoles y Cambisoles (FAO,

2006) de carácter ácido con textura limosa y franco limosa. Tiene un área de drenaje de aproximadamente 16 km² y una pendiente media del 19%. Es un claro ejemplo de cuenca de uso agrícola y forestal, con un 30% de su superficie dedicada a praderas (en su mayoría) y cultivos (esencialmente maíz y cereal de invierno) y un 65% de uso forestal (pinos y eucaliptos). En la cuenca se lleva a cabo agricultura de tipo convencional.

Muestreo y análisis

En este estudio se muestran 4 eventos de escorrentía acaecidos entre el período diciembre de 2004 y octubre de 2005. Durante estos episodios se tomaron muestras de agua en el cierre de la cuenca con un muestreador automático (ISCO 6712FS) que lleva asociado un sensor de presión para la medida del nivel de agua en continuo. Los datos de nivel se transformaron en caudal a partir de una curva de gasto.

Las muestras sin filtrar se utilizaron para la determinación de SS (por gravimetría) y fósforo total (PT) mientras que las muestras filtradas (0,45 µm) se emplearon para la obtención del PD. El PT se determinó por colorimetría (Murphy y Riley, 1962) previa digestión con persulfato amónico (APHA, 1998) y el PD por ICP-MS. El PP se calculó como la diferencia entre el PT y el PD.

Medida de surcos, cárcavas efímeras y depósitos de sedimentos

Después de cada evento de lluvia se realizaron inspecciones visuales en la cuenca, prestando especial atención a las zonas de cultivo, con el fin de localizar áreas afectadas por erosión, en particular, por flujo concentrado. Cuando se observó la formación de surcos y cárcavas efímeras se determinó el suelo perdido, midiendo la longitud y sección de cada uno de estos canales, así como los depósitos de sedimentos. Se consideró una densidad de 1500 kg/m³ para calcular la masa de suelo erosionado.

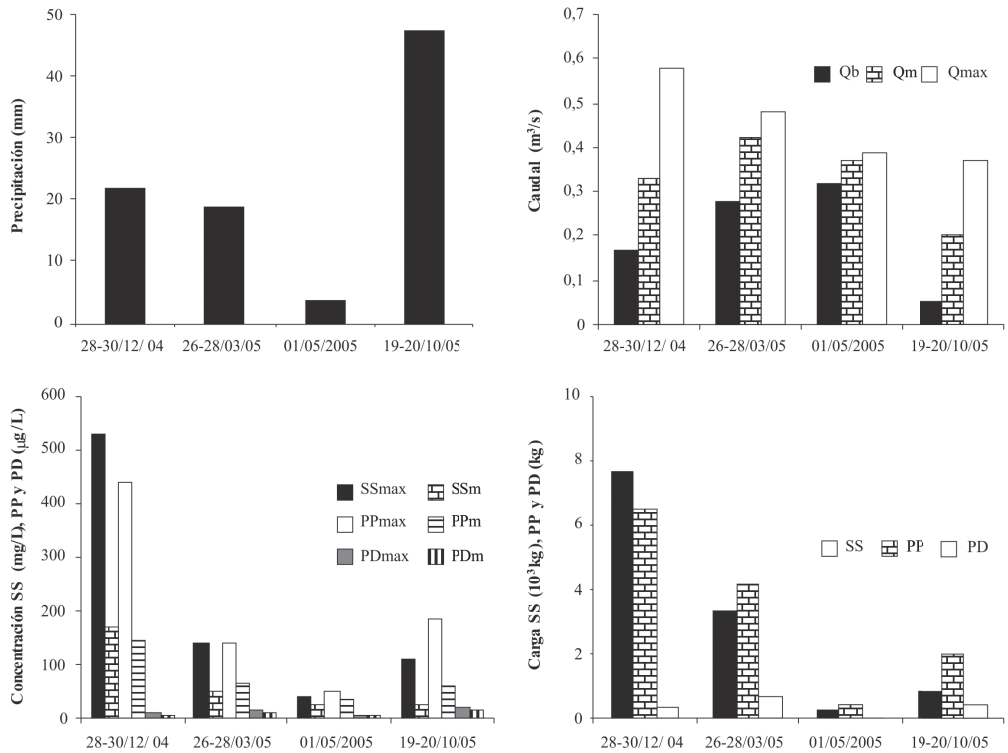


Figura 1. Principales características de los eventos. P: precipitación. Qb, Qm y Qmax: caudal inicial, medio y máximo del evento. SSmax, PPmax y PDmax: concentración máxima. SSm, PPM, PDM: concentración media.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evolución de las concentraciones de SS y P

En la figura 1 se muestran las características de los eventos estudiados. Se observa que presentan distinta magnitud tanto en cuanto a la precipitación como al caudal así como a la producción de SS y PP.

Las concentraciones máximas de SS y PP variaron considerablemente entre eventos, alcanzándose las concentraciones más elevadas en el evento 28-30/12/04 (evento 1), con valores de 530 mg/L y 448 µg/L respectivamente. El evento 1 se produjo en la mitad de la estación húmeda bajo condiciones que activaron el aporte de sedimentos a la red

de drenaje. Probablemente esto fue la razón de los elevados contenidos de SS y PP de este evento.

El PP constituye la fracción mayoritaria de P en todos los eventos analizados, representando más del 80% de la concentración media de este elemento en cada uno de ellos (Fig. 1). Mantiene siempre una correlación significativa y positiva con la concentración de SS ($r_2 > 0,75$; $p < 0,05$), evidenciando una buena afinidad por las partículas.

La concentración de PD experimentó una menor variación que la del PP (Fig. 1), obteniéndose la mayor concentración en el evento 19-20/10/05 (evento 4).

La figura 2 muestra el comportamiento

de los materiales en suspensión, así como la evolución del PP y PD en relación al caudal durante el evento 4. Se observa que los SS y el PP, experimentan un rápido incremento de la concentración desde el inicio del evento, alcanzando su valor más elevado antes del pico de caudal, instante a partir del cual la concentración desciende hasta mantenerse en niveles próximos a los iniciales, es decir, a los del flujo base. Este es el comportamiento característico de estos parámetros en todos los eventos. Sin embargo el PD a pesar de incrementarse, excepto en el evento 01/05/05 (evento 3), sigue un patrón diferente al de la fracción particulada. Así, en los eventos 1 y 4 la concentración máxima se

alcanza tras el pico de caudal, lo que podría relacionarse con su llegada al arroyo a través del flujo subsuperficial, tal como señala frecuentemente la bibliografía (Dorioz y Ferhi, 1994; Richards et al., 2001).

Exportación de SS y P

La carga de SS así como la de PP y PD fue muy variable entre eventos como resultado de las variaciones de caudal y de las concentraciones (Fig. 1). La mayor carga de material en suspensión y fósforo asociado se registró en el evento 1, el de mayor caudal instantáneo durante el periodo de observación, con valores de 7659 kg y 6,51 kg, lo que equivale a una exportación de

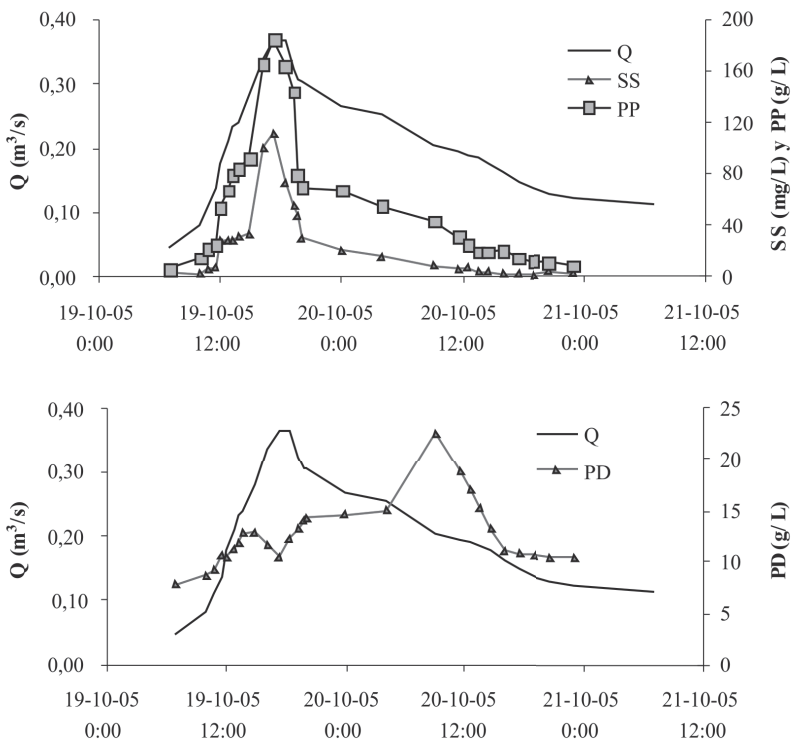


Fig. 2. Evolución de las concentraciones de SS, PP y PD durante el evento 4.

483,23 kg/km² de SS y 0,41 kg/km² de PP. La carga total de los eventos ascendió a 12200 kg de SS y a 13,20 kg de PP, de los cuales un 64% y 49% respectivamente se produjo en el evento 1. Esto refleja la magnitud de este evento, frente a los demás, en cuanto a exportación de materiales y PP de la cuenca. La elevada contribución de un único evento a la exportación de materiales se ha constatado en diversas ocasiones, tanto en condiciones de clima atlántico (Steege et al., 2001) como mediterráneo (Regüés et al., 2000).

En lo que se refiere al PD, las cargas más elevadas se obtuvieron en el evento 26-28/03/05 (evento 3), ascendiendo a 0,66 kg lo que equivale a una exportación de 0,04 kg/km².

La elevada carga de SS del evento 1 respecto a los restantes puede explicarse en base al aporte de sedimentos procedentes de surcos y cárcavas efímeras desarrolladas en una parcela de acusada pendiente (clase 5 de la FAO) próxima al arroyo. La generación de estas formas de erosión, probablemente estuvo favorecida por la ausencia de cubierta vegetal y el estado encostrado de la superficie del suelo, tal como constataron otros estudios efectuados en suelos de cultivo del Complejo de Órdenes (Taboada, 1999). La pérdida de suelo debido a estos surcos y cárcavas efímeras ascendió a 7400 kg, de los cuales aproximadamente 500 kg se depositaron en la parcela y el resto alcanzaron el arroyo. Comparando la carga de sedimento registrada en la salida de la cuenca (7659 kg) con los sedimentos aportados por los surcos y cárcavas efímeras, se deduce que éstos constituyen la principal fuente de sedimento exportado. Por otra parte, la buena relación entre PP y SS apunta a que los sedimentos, procedentes de estos canales de erosión, son los principales agentes transportadores de PP al arroyo, y por tanto, los causantes de la elevada carga de PP del evento 1.

Las diferencias de carga de sedimentos en los restantes eventos podrían explicarse

tanto por la magnitud del evento como por la época del año en que han acaecido. Así el evento 2 tuvo lugar durante la primavera, período en el que varias parcelas de la cuenca se encuentran desprotegidas, bien debido a la siembra de patata o a las labores preparatorias para el cultivo de maíz, lo que unido al mayor volumen de agua de este evento, en relación con los restantes, posiblemente facilitó un mayor arrastre de sedimentos, y por consiguiente de PP, hasta la red de drenaje. Por el contrario, el evento 4 acaeció al inicio de la estación de otoño, cuando los suelos todavía estaban secos y las parcelas de cultivo con alta rugosidad. Esto podría explicar la baja carga de SS y PP del evento, aun cuando la precipitación que lo generó fue muy superior a la de los otros.

CONCLUSIONES

La concentración de SS y PP muestra un incremento durante los eventos, variando considerablemente entre eventos. El PP, que representa más del 80% del total, se correlaciona positivamente con los SS, indicando el origen erosivo de una gran parte del P. Tanto las concentraciones máximas, como la carga de SS y PP, mostraron acusadas diferencias entre eventos. Los SS exportados oscilaron entre 19,66 y 483,23 kg/km², mientras que el PP varió entre 0,03 y 0,41 kg/km². Los surcos y cárcavas efímeras desarrolladas en zonas de cultivo constituyeron la principal fuente de sedimentos exportados de la cuenca.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado dentro de los proyectos REN2003-08143 financiado por el MEC y FEDER, y PGIDT04PXIC10309PM financiado por la Xunta de Galicia. Los autores agradecen al MEC la concesión de una beca FPI (BES-2004-4927) a M. L. Rodríguez-Blanco.

BIBLIOGRAFÍA

- APHA (1998): Standar Methods for Examination of Water and Wastewater, 20th edn. Washington, DC.
- Correll, D.L., Jordan, E.T., Weller, D.E. (1999): Transport of nitrogen and phosphorus from Rhode River watersheds during storm events. *Water Resour. Res.* 35, 2513-2521.
- Pommel E. y Dorioz J.M. (1997): Movement of phosphorus from agricultural soil to water. En: *Phosphorus Loss from Soil to Water*. H. Tunney, O.H. Carton, P.C. Brookes, A.E. Johnston (Ed). CABI Publishing, 243-251.
- Evans D.J. y Johnes P.J. (2004): Physico-chemical controls on phosphorus cycling in two lowland streams. Part 1-the water column. *Sci. Total Environ.* 329, 145-163.
- FAO. (2006): World Reference Base for Soil Resources, World Soil Resources Reports. FAO, 103, Rome, Italy.
- Haygarth, P.M. y Jarvis, S.C. (1999): Transfer of phosphorus from agricultural soils. *Adv. Agron.* 66, 195-249.
- Kronvang, B., Grant, R., Laurel, A.R., Pedersen, L. (2002): Quantifying sediment and nutrient pathways within Danish agricultural catchments En: *Agriculture, hydrology and water quality*. P.M. Haygarth and S.C. Jarvis (Ed). CABI Publishing, 281-301.
- Martínez JR, Klein E, De Pablo Macía JG, González F. (1984): El Complejo de Órdenes: Subdivisión, descripción y discusión sobre su origen. *Cad. Lab. Xeol. Laxe* 7, 120-139.
- Murphy J. y Riley, J.B. (1962): A modified single solution methods for determination of phosphates in natural waters. *Anal. Chim. Acta* 27, 31-36.
- Regüés, D., Balasch, J.C., Castellort, X., Soler, M., Gallart. (2000): Relación entre las tendencias temporales de producción y transporte de sedimentos y las condiciones climáticas en una pequeña cuenca de montaña mediterránea (Vallcebre, Pirineos Orientales). *Cuad. Invest. Geográfica* 26, 41-65.
- Richards, R.P, Baker, D.B., Kramer, J.W., Swing, D.E., Merryfield, B.J., Millar, N.L. (2001): Storm discharge, load, and average concentrations in North-west Ohio Rivers, 1975-1995. *J. Am. Water Res. Ass.* 37 (2), 423-438.
- Sharpley, A.N. y Tunney, H. (2000): Phosphorus research strategies to meet agricultural and environmental challenges of the 21 st. century. *J Environ, Qual.*, 176-181.
- Steege, A., Govers, G., Takken, J., Nachtergaele, J., Poesen, J., Merckx. (2001): Factors controlling sediment and phosphorus export from two Belgian agricultural catchments. *J. Environ. Qual.* 30, 1249-1258.
- Taboada-Castro, M.M. (1999): Génesis y clasificación de costras superficiales en suelos de cultivo. En: *Avances sobre el estudio de la erosión hídrica*. A. González y Taboada Castro M.T. (Ed), publicaciones de la Universidad de A Coruña colección cursos, congresos y simposios,

EFECTO DE DIFERENTES LECHOS DE SIEMBRA SOBRE LA FORMACIÓN DE COSTRAS SUPERFICIALES BAJO LLUVIAS NATURALES

Taboada Castro, M. M., Rodríguez Blanco, M. L., Taboada Castro, M. T.

Universidad de A Coruña. Facultad de Ciencias. A Zapateira. CP. 15071. A Coruña.
E-Mail: teresat@udc.es

Resumen. Se estudia la dinámica de evolución de la superficie del suelo inducida por lluvia acumulada, en un Cambisol de textura franco-limosa (A Coruña, NW España). Se eligieron superficies recién labradas con diferente rugosidad inicial: arada (gruesa), lechos de siembra de maíz (rugosidad media) y de pradera (fina). Mediante estimaciones visuales in situ, se describen los estados de la costra y otros cambios morfológicos que acompañan a este proceso. Para alcanzar un determinado estado de evolución de la superficie se requirieron cantidades variables de lluvia acumulada. En todos los tratamientos se desarrolló costra estructural (90 y 159 mm en maíz y arada, respectivamente), evolucionando hasta sedimentaria con diferente rapidez y bajo cantidades variables de lluvia: con 30 mm el lecho de pradera estaba totalmente encostrado, mientras que con alrededor de 320 mm solamente un 75% de la extensión de la superficie arada estaba cubierta por costra sedimentaria no continua. A medida que avanza el encostrado se observa que los agregados creados por el laboreo van integrándose a la costra, y que la rugosidad y la macroporosidad inicial descienden paulatinamente. La escorrentía generada alcanzó diferentes distancias, desde centímetros hasta varios metros en función de las condiciones superficiales.

Palabras clave: laboreo, rugosidad inicial, encostrado del suelo, lluvia acumulada.

Abstract. This study was focused to observe the evolution dynamic of soil surface induced by cumulated rainfall, in a Cambisol with a silt-loam texture. Some recently-tilled surfaces with different initial roughness were chosen: surface plowing (coarse), maize seedbeds (medium roughness) and grassland seedbed. We performed visual assessments in situ to describe the crust stages and other morphological changes that accompany this process. To reach a certain stage of crust development is required different amounts of accumulated rainfall. All treatments were developed structural crust (90 and 159 mm in maize seedbed and soil plowing, respectively), evolve to sedimentary crust but with different rapidly and with variable rainfall amounts: after 30 mm grassland seedbed was crusting, whereas after 320 mm only 75% of the area was covered by a no-continuous sedimentary crust. At the same time that progresses the crusting was observed that the aggregates created by tillage are integrated into the crust and that the initial roughness and initial macroporosity decreased gradually. Runoff reached different distances from centimeters to several meters depending on surface conditions.

Key words: soil crusting, initial roughness, tillage, cumulated rainfalls.

INTRODUCCIÓN

La degradación del suelo por efecto de la lluvia puede comenzar con la formación de

costras superficiales, fenómeno que afecta a una gran parte de suelos agrícolas a nivel mundial. El encostrado de la superficie ha sido objeto de numerosas investigaciones

(McIntyre 1958; Valentín y Bresson, 1992; Le Bissonnais et al., 1995; Robinson y Phillips, 2001; Gallardo-Carrera et al., 2007).

Las costras del suelo hacen referencia a una capa superficial compacta, de baja porosidad, poco permeable al agua y al aire y densidad aparente más alta que el suelo subyacente. El encostramiento introduce una serie de modificaciones de la estructura física del suelo que afectan implícitamente a sus propiedades hídricas, ya que reduce la infiltración (Moore y Singer 1990) y causa una disminución de la rugosidad (Lado Liñares et al., 1999), proporcionando condiciones óptimas para la generación de escorrentía superficial y fenómenos erosivos (Moore y Singer, 1990; Le Bissonnais et al., 1995). Además, puede limitar la capacidad de germinación y crecimiento de las plántulas (Valenciano 2003).

El desarrollo de una costra superficial ocurre en dos etapas: proceso de sellado (fase de rotura de los agregados bajo la acción de la lluvia y reorganización de estos con el suelo húmedo) y proceso de encostrado (fase de endurecimiento durante el secado de la superficie (Slattery y Bryan, 1992). En este proceso intervienen las propiedades del suelo, las características de la lluvia, las condiciones del flujo y las prácticas agrícolas (Truman et al., 1990; Freebairn et al., 1991; Bartès y Roose, 2002; Baumhart et al., 2004). No obstante, debido a la gran variedad de condiciones climáticas y edáficas en las que se puede originar dicho proceso, resulta difícil evaluar la naturaleza e intensidad del encostrado del suelo, analizar su origen y predecir sus consecuencias.

En la literatura existen varias clasificaciones de costras, no obstante muchos autores diferencian tres estados principales: estado fragmentario inicial o superficie recién labrada (F0), costra estructural (F1) y costra sedimentaria (F2). Estas dos últimas categorías corresponden a dos estados

sucesivos dentro de un patrón general de formación de costras y los cambios desde el primer estado al segundo dependen de la respuesta de la superficie del suelo a la lluvia (Bresson y Boiffin 1990). Algunos autores añaden estados intermedios de la costra (F12), que miden de manera más precisa la proporción relativa entre costra estructural y sedimentaria. La costra estructural se debe a la reorganización in situ de partículas procedentes de la rotura de agregados, en tanto que, la costra sedimentaria surge por desplazamiento lateral y deposición de partículas desintegradas sobre la superficie. El proceso de reorganización afecta en primer lugar a los agregados de menor tamaño, es decir, son estos los primeros en incorporarse a la costra. A medida que progresa la degradación de la superficie del suelo con las lluvias, aumenta paulatinamente el tamaño de los agregados que permanecen sin soldar, hasta que finalmente, en estados muy avanzados de degradación todos quedan embebidos en la costra. Por tanto, el diámetro mínimo de los agregados no incorporados a la costra es un indicador de la velocidad de degradación de la superficie del suelo. A su vez, la desintegración de los agregados conlleva a un descenso de la rugosidad superficial, parámetro frecuentemente evaluado en estudios de costras (Freebairn et al., 1991; Le Bissonnais et al., 2005).

La finalidad de este estudio es analizar la dinámica de evolución de la superficie del suelo, por efecto de lluvias naturales, en cuatro superficies recién labradas con diferente rugosidad inicial: suelo arado (rugoso), lechos de siembra de maíz (rugosidad media) y lecho de siembra de pradera (fino). Para ello, se efectúa una descripción morfológica de los cambios producidos en cada superficie por diferentes cantidades de lluvias acumuladas, contabilizadas a partir de la superficie recién labrada.

Tabla 1. Características físico-químicas del suelo (valores medios)

Tipo de lecho	pH		C	MO	Arena	Limo	Arcilla	Textura
	H ₂ O	KCl						
Maíz-1	5,9	5,0	2,8	4,90	28	59	13	Franco limosa
Arada	5,2	4,4	2,1	3,6	30	54	16	Franco limosa
Maíz-2	5,3	4,7	2,6	4,6	32	53	14	Franco limosa
Pradera	5,2	3,9	2,6	4,5	31	51	17	Franco limosa

MATERIAL Y MÉTODOS

Características del área de estudio

El estudio se efectuó en una parcela agrícola localizada en Cullergondo (A Coruña), donde la media anual de lluvia es de 1024 mm (1985-2005) y la temperatura de 13,7 C°. Las lluvias generalmente son de moderada o baja intensidad (<10 mm/h). En primavera pueden producirse tormentas que causan un rápido encostramiento de la superficie. El suelo del área experimental es un Cambisol (FAO, 2006), derivado de esquistos básicos (Parga Pondal, 1966), de pH ácido y textura franco-limosa (Tabla 1). La mayor parte de la extensión de esta parcela (90%) presenta una pendiente superior al 5%.

Prácticas agrícolas y seguimiento de la evolución de la superficie

La parcela experimental, sometida a laboreo convencional, se dedicó durante dos años al monocultivo de maíz tras el cual se implantó una pradera. Las experiencias se efectuaron en cuatro ocasiones cuando la parcela se encontraba labrada con motivo de la preparación y siembra: a) lecho de siembra de maíz del primer año (maíz-1), b) superficie arada en invierno, c) lecho de siembra de maíz del segundo año (maíz-2) y d) lecho de siembra de pradera en otoño. Estas superficies muestran diferente rugosidad inicial: gruesa en el suelo arado, media en los lechos de maíz

y muy fina en pradera, en la cual un pase de rulo dejó una superficie lisa y compacta (0-1 cm en zona de entresurco y 2-5 cm en rodadas). La siembra de maíz se realizó en dirección perpendicular a la pendiente y las operaciones de arado y siembra de pradera en dirección paralela a esta.

Partiendo del suelo recién labrado (estado inicial, F0) se describen los cambios morfológicos que ocurren en estas superficies a medida que se degrada la superficie por efecto de lluvias acumuladas, atendiendo a los siguientes parámetros: estado de la superficie, diámetro mínimo de los agregados no incorporados a la costra, macroporosidad, rugosidad y distancia máxima alcanzada por la escorrentía. Para ello se realizan estimaciones visuales in situ, siguiendo una clave propuesta por Bresson y Boiffin (1990), sintetizada en la tabla 2.

En general, las observaciones tuvieron lugar principalmente después de lluvias importantes. Una secuencia de evolución se da por finalizada cuando la costra sedimentaria cubre más del 90% de la parcela o cuando el proceso de encostrado queda interrumpido por una nueva operación de laboreo o por el desarrollo del cultivo.

Al inicio de cada tratamiento (laboreo reciente) se tomaron muestras compuestas, entre 0-5 cm de profundidad, para análisis generales.

Tabla 2. Resumen de la clave propuesta por Bresson y Boiffin (1990) para describir la evolución morfológica de la superficie del suelo.

Estado superficie	Clase	Descripción
	F0	Estado inicial inmediatamente después del laboreo
	F1+	Estado fragmentado y alterado con costra estructural
	F12	Estados intermedios entre costra estructural y edimentaria
	F2+	Costra sedimentaria continua en más del 90% de la superficie
Diámetro agregados*	Índice (mm)	Descripción
	0,5	Suelo recién labrado, pulverulento (suelo seco)
	1	Suelo recién labrado (suelo húmedo)
	> 0,5 y < 20	Agregados susceptibles de soldarse a la costra
	≥ 20	Agregados grandes no soldados a la costra sedimentaria continua
Rugosidad	Índice de rugosidad (cm)	Situación agrícola típica
	0-1	Lecho de siembra compactado
	1-2	Lecho de siembra fino
	2-5	Lecho de siembra moderadamente grueso
	5-10	Lecho de siembra muy grueso
	>10	Campos arados/caballones
Porosidad	Índice de porosidad (macroporos/m²)	
	100	
	50	
	10	
	0	
Escorrentía	Índice de escorrentía (m)	
	0	
	10 ⁻²	
	10 ⁻¹	
	10 ⁰	
	10 ¹	
	≥10 ²	

*Diámetro mínimo de los agregados del suelo no incorporados a la costra (Se considera que todos los agregados están integrados a la costra cuando los agregados de 20 mm se encuentran formando parte de la costra)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evolución del diámetro mínimo de los agregados

En las figuras 1 y 2 se muestra la evolución del diámetro mínimo de los agregados no soldados en relación al tiempo transcurrido desde el estado inicial y en función de la lluvia acumulada. Se observa que el número de días que tardaron en incorporarse los agregados a la costra fue muy variable entre superficies (Fig. 1). Así, seis días después de la siembra de pradera (lecho fino), y treinta y nueve días después de la labor de arado (lecho muy rugoso), todos los agregados ≤ 20 mm, inicialmente sueltos y bien delimitados, se encontraban formando parte de la costra. Sin embargo, en los lechos de siembra de maíz el tiempo de incorporación fue superior, siendo casi el doble maíz-1 (63 días). En maíz-2, 148 días después de la siembra se observaron agregados entorno a

10 mm que todavía permanecían sin soldar. El patrón de evolución del diámetro mínimo de los agregados en función de las lluvias acumuladas (Fig. 2) mostró similitudes en las primeras fases de evolución, sin embargo, la dispersión de los datos tiende a aumentar conforme se degrada la superficie. Entre 50 y 150 mm de lluvia acumulada, la evolución del diámetro mínimo fue del mismo orden de magnitud en la superficie arada y en las sembradas con maíz. A partir de 150 mm se incrementó la dispersión de los datos: con 301 mm en la superficie arada se distinguían todavía agregados mayores de 16 mm de diámetro sin soldar, con 243 mm aún permanecían agregados libres (≥ 10 mm) en maíz-2 y con 180 mm todos los agregados estaban soldados a la costra en maíz-1. Un caso especial ocurrió en el lecho de pradera en el que 30 mm de lluvia acumulada fueron suficientes para integrar todos los agregados.

La diferente evolución de los agregados hasta entrar a formar parte de la costra podría

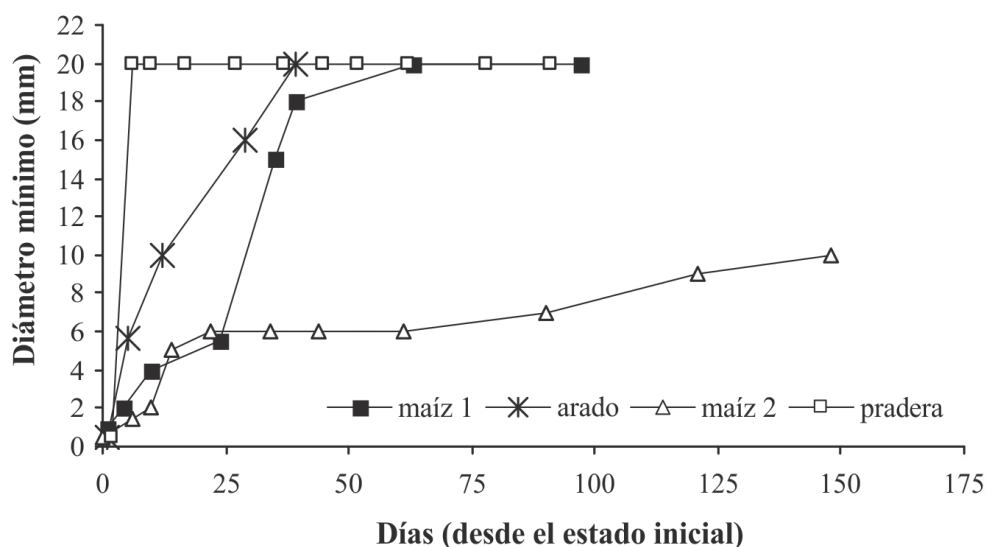


Figura 1. Evolución del diámetro mínimo de los agregados en relación al tiempo transcurrido desde el estado inicial ($n = 36$). * Se consideran que los agregados están totalmente incorporados a la costra cuando no se aprecian sin soldar agregados con diámetros de 20 mm.

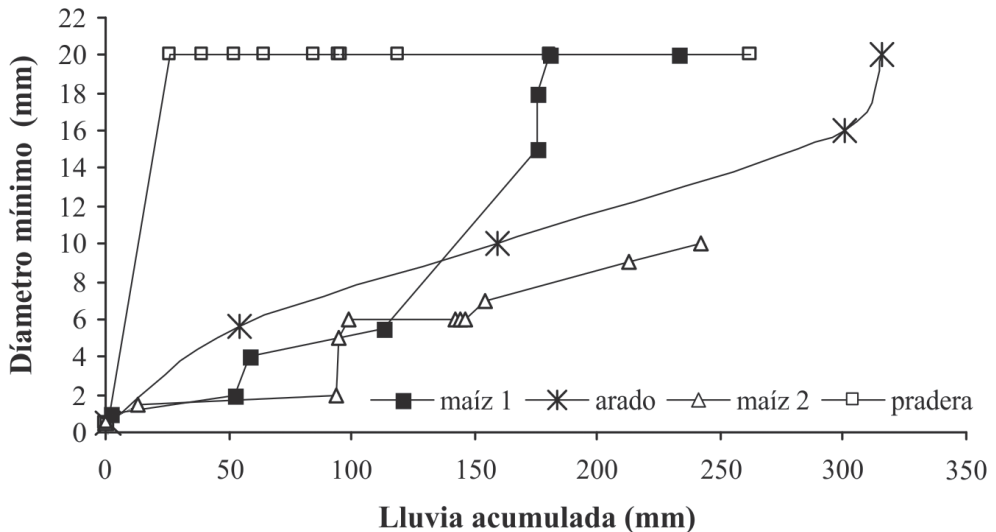


Figura 2. Evolución del diámetro mínimo de los agregados en función de la lluvia acumulada ($n = 36$). * Se consideran que los agregados están totalmente incorporados a la costra cuando no se aprecian sin soldar agregados con diámetros de 20 mm.

estar influenciada por la distribución de las lluvias, el tamaño de agregados generados por cada tipo de laboreo y la humedad antecedente de la superficie. Fernández Rueda (1997) describiendo la evolución temporal de superficies labradas en zonas agrícolas próximas a la del presente estudio, encontró un patrón de evolución del diámetro mínimo de los agregados semejante al aquí descrito. Por otra parte, Bljenberg et al., 2000, pusieron de manifiesto que la relación entre diámetro mínimo y lluvia acumulada presentaba una notable variabilidad entre distintos tipos de suelo y de laboreo, incluso bajo la acción de lluvias controladas.

Encostrado del suelo: consecuencias sobre la rugosidad, porosidad y escorrentía

Formación de costras

El desarrollo de costra no solamente está asociado a la evolución del diámetro de los agregados si no que además conlleva cambios en la rugosidad y en la porosidad superficial

tal como reflejan los datos recogidos en la tabla 3. Después del laboreo (estado inicial, F0) todas las superficies, excepto pradera, se encostraron gradualmente por efecto de la lluvia, desarrollando una costra estructural que evolucionó hasta distintos estados de costra sedimentaria. La evolución en el lecho de pradera fue tan rápida que impidió diferenciar el paso de costra estructural (F1+) a sedimentaria (F2+). El encostramiento tuvo lugar preferentemente durante los períodos en los que el suelo se encontraba desnudo o con escasa vegetación, siendo la emergencia y/o las primeras fases de desarrollo de los cultivos los períodos más críticos para la formación de costras.

La cantidad de lluvia acumulada necesaria para el inicio y desarrollo de los sucesivos estados de costra fue variable en cada secuencia de evolución. Así, con 56 mm de lluvia acumulada se visualizó una costra estructural incipiente (F1-) en maíz-1 y en la superficie arada, pasando a costra estructural

(F1+) tras 86 y 159 mm, respectivamente, y tras 95 mm en maíz-2. A partir de este estadio (F1+) el patrón de evolución hacia la facies sedimentaria fue más heterogéneo. Los lechos de maíz continuaron degradándose, aunque a distinta velocidad según los años, debido a la diferente distribución de las lluvias en las fases de emergencia y desarrollo del cultivo. En maíz-1, una lluvia acumulada de 181 mm registrada en las primeras fases de desarrollo del cultivo originó costra sedimentaria (F12+) tanto en zonas de entresurcos como en caballones. Sin embargo, en maíz-2 las lluvias caídas en esa misma fase (cubierta vegetal < 40%) solo produjeron costra sedimentaria incipiente (F1/2+), y las acaecidas hacia el final de su desarrollo (cubierta vegetal > 90%) no promovieron grandes cambios, debido probablemente al abundante follaje que interceptó el impacto de las gotas de lluvia, de modo que al término del periodo de observaciones (242 mm), solamente entre un 50 y 75 % de la superficie mostró signos de costra sedimentaria no continua (F2-). Por otra parte, en los casi dos meses que permaneció el suelo arado se registraron las precipitaciones más elevadas del estudio, totalizando 316 mm. A pesar de ello, el proceso de degradación de esta superficie fue lento con respecto a los lechos de siembra, lo que puede atribuirse a su elevada rugosidad. En este tipo de superficies rugosas las primeras manifestaciones de formación de una costra sedimentaria se circunscriben a las microdepresiones. A medida que se suceden nuevos episodios de lluvia los fenómenos de rotura y transporte de partículas continúan, de modo que los huecos entre los terrones se van rellenando y acaban conectándose con otros contiguos, dando lugar a la expansión de la costra. En las zonas llanas de esta superficie arada el encostrado no era continuo, en tanto que, en las de pendiente más del 90% de la superficie estaba recubierta por costra sedimentaria (F2+). Finalmente, la evolución

de la superficie durante la implantación de pradera, inicialmente compactada y pulverizada, fue muy rápida difiriendo de las demás situaciones agrícolas. De hecho, con tan solo 30 mm de lluvia acumulada prácticamente la totalidad de la superficie quedó cubierta por costra sedimentaria (F2+).

La diferente respuesta de la superficie del suelo a la lluvia en las cuatro condiciones de estudio (maíz/arado/maíz/pradera) sugiere que la rugosidad inicial creada por el laboreo y las características de las lluvias son los principales factores implicados en la evolución de estas superficies. En este sentido cabe señalar que Gallardo-Carrera et al. (2007) en Luvisoles del norte de Francia también observaron que la formación de costra requiere diferentes cantidades de lluvia acumulada en función de la rugosidad del lecho de siembra. Además, tanto estos como otros autores (Le Bissonnais et al., 1995) indican que el contenido hídrico del suelo en el estado inicial (F0) es otro factor implicado en la dinámica de evolución de la superficie, siendo los lechos finos y secos los más sensibles al encostramiento.

Evolución de la rugosidad y de la porosidad

La rugosidad inicial creada por el laboreo se modificó por efecto de la lluvia (Tabla 3). Las observaciones revelaron que la rugosidad orientada (formada sistemáticamente al cultivar el suelo), fue poco sensible a la degradación por efecto de la lluvia. De hecho se mantuvo relativamente constante durante toda la secuencia de evolución, permaneciendo dentro del mismo intervalo de rugosidad definido en el estado inicial (entre 5-10 cm en caballones de maíz, entre 10-20 en arado y entre 2-5 cm en rodadas de sembradora en la pradera). En cambio, la rugosidad aleatoria (disposición aleatoria de agregados y terrones sobre la superficie), fue más sensible al efecto de la degradación por las lluvias acumuladas, observándose una

reducción de esta en todas las superficies, excepto en pradera, puesto que ya se partía de una superficie inicialmente lisa. En algunos casos la rugosidad inicial y final se adscribieron a la misma clase o intervalo de rugosidad, lo cual sugiere que estas clases de rugosidad son poco sensibles para describir los fenómenos de encostrado.

Otra característica afectada por la lluvia es la macroporosidad, la cual fue inicialmente muy elevada en la superficie arada y en los lechos de maíz, estimándose en más de 100 macroporos/m² (Tabla 3). En pradera, el pase de un rulo liso después de la siembra compactó la superficie, por tal motivo la densidad de macroporos es menor que en las anteriores (50 macroporos/m² e incluso 10 macroporos/m² en zonas muy compactadas). El descenso de este parámetro después de varios episodios de lluvia fue patente en todas las superficies. Una vez encostrado el suelo descendió considerablemente, siendo este del orden de 50 a 10 macroporos/m² en la superficie arada, inferior a 10 macroporos/m² en maíz y sin macroporos en pradera. El descenso de la macroporosidad con el desarrollo de costra ha sido evidenciado en numerosas ocasiones. En costras sedimentarias en fase de máximo desarrollo, se ha constatado la ausencia de macroporos o presencia muy limitada (Kooistra y Siderius, 1986; Arshad y Mermut, 1988).

Formación de escorrentía

De los resultados mostrados en la tabla 3, se infiere que la distancia alcanzada por las partículas finas transportadas por la escorrentía varió en función del estado de encostrado, rugosidad y dirección del laboreo en cada caso de estudio.

En la superficie arada el efecto de la pendiente local contribuyó a que las partículas más finas se desplazasen 100 m desde su lugar de origen. En el maíz se apreciaron desplazamientos centimétricos durante la

siembra del primer año y métricos durante el año siguiente, en ambos casos localizados en el fondo del surco entre caballones. Las observaciones de campo mostraron que en este corto desplazamiento de las partículas influyó la dirección de las hileras de maíz (perpendiculares a la pendiente). En la pradera, la escorrentía se comportó de forma diferente en las zonas de entresurcos y en las rodadas. En el primer caso, se produjeron desplazamientos decamétricos (101 m), favorecidos por la interacción conjunta de tres circunstancias: capacidad de infiltración del suelo reducida por la presencia de costra, ausencia de almacenamiento temporal de agua en las microdepresiones (superficie muy lisa) y dirección de siembra a favor de la máxima pendiente. En las rodadas la escorrentía difirió notablemente del modelo descrito siendo al menos un orden de magnitud superior al del entresurco (valores no presentados en la Tabla 3).

CONCLUSIONES

Los resultados indican que cuando el suelo está desnudo o con escasa vegetación, lo cual bajo laboreo convencional ocurre varias veces a lo largo del año, la superficie evoluciona por efecto de la lluvia dando lugar a distintos estados de desarrollo de la costra. La cantidad de lluvia acumulada requerida para alcanzar un determinado estado de evolución fue variable, dependiendo principalmente de la rugosidad inicial del lecho y de las características de las lluvias. La dinámica de evolución de la superficie en el lecho fino fue muy rápida en comparación con el lecho grueso, el cual mostró menor sensibilidad al encostrado. Promover prácticas de manejo que disminuyan el número de laboreos y que aumenten la rugosidad superficial podría resultar eficaz para impedir o al menos reducir el desarrollo de costras en estos suelos de textura franco-limosa.

Tabla 3. Descripción morfológica de la superficie en una sucesión de cultivos.

Nº Días E.I. (*)	Lluvia acumulada (mm)	Estado de la superficie	Rugosidad aleatoria (cm)	Rugosidad orientada (cm)	Macroprosidad (nº/m²)	Escorrentía (m)
Superficie sembrada con maíz (1º año)						
1	1.9	F0	2-5	5-10	100	0
4	52.1	F1-	2-5	5-10	50	0
10	85.8	F1+	2-5	5-10	50	0
24	113.4	F2-	2-5	5-10	10	10 ⁻¹
35	175.3	F2-	2-5	5-10	10	10 ⁻¹
39	175.3	F2-	2-5 / 1-2	5-10	10	10 ⁻¹
63	180.7	F2+	2-5/ 1-2/ 0-1	5-10	0-10	10 ⁻¹
Superficie arada (arado chisel)						
1	1.5	F0	5-10	10-20 / >20	100	0
5	54.6	F1-	5-10	10-20 / >20	100	10 ⁰
12	159	F1+	5-10	10-20 / >20	100-50	10 ⁰
29	300.4	F2-	5-10 / 2-5	10-20 / >20	50	10 ⁰
39	316	F2- a F2+	5-10 / 2-5	10-20 / >20	50-10	10 ⁰
Superficie sembrada con maíz (2º año)						
0	0	F0	2-5	5-10	100	0
6	12.9	F0+	2-5	5-10	100	0
10	94.3	F1+	2-5	5-10	50	10 ⁻² / 10 ⁻¹ / 10 ⁰
14	94.5	F1/2-	1-2 / 2-5	5-10	50	10 ⁻² / 10 ⁻¹ / 10 ⁰
22	98.9	F1/2-	1-2 / 2-5	5-10	50	10 ⁻² / 10 ⁻¹ / 10 ⁰
34	141.9	F1/2+	1-2 / 2-5	5-10	50	10 ⁻² / 10 ⁻¹ / 10 ⁰
44	143.9	F1/2+	1-2 / 2-5	5-10	50	10 ⁻² / 10 ⁻¹ / 10 ⁰
61	146.2	F1/2+	1-2 / 2-5	5-10	50	10 ⁻² / 10 ⁻¹ / 10 ⁰
90	154.7	F1/2+	1-2 / 0-1	5-10	50	10 ⁻² / 10 ⁻¹ / 10 ⁰
121	213.3	F2-	1-2 / 0-1	5-10	10	10 ⁻² / 10 ⁻¹ / 10 ⁰
148	242.3	F2-	1-2 / 0-1	5-10	10	10 ⁻² / 10 ⁻¹ / 10 ⁰
Superficie sembrada con pradera						
0	0	F0	0-1	1-2 / 2-5	50-10	0
2	0.7	F0+	0-1	1-2 / 2-5	50-10	0
6	29.6	F2+	0-1	1-2 / 2-5	10	10 ⁻² / 10 ⁻¹ / 10 ⁰
17	52.3	F2+	0-1	1-2 / 2-5	10-0	10 ⁻¹ / 10 ⁰ / 10 ¹
62	118.7	F2+	0-1	1-2 / 2-5	0	10 ⁻¹ / 10 ⁰ / 10 ¹

(*) Nº de días, E.I.: Número de días desde el estado inicial, es decir, desde la última operación agrícola.

Descripción de los diferentes estados de la costra:

- Estados principales de la costra

F0: Estado inicial, superficie recién labrada y sin lluvia;

F1+: Costra estructural;

F2+: Costra sedimentaria continua cubriendo más del 90% de la superficie.

- Estados intermedios de la costra

F1-: costra estructural incipiente;

F1/2-; F1/2+: Costra sedimentaria no continua cubriendo < 10% y < 50% de la superficie, respectivamente.

F2-: Costra sedimentaria no continua cubriendo entre el 50% y el 75% de la superficie.

** El laboreo no crea superficies homogéneas por lo que en algunos casos es necesario describir la evolución de un parámetro mediante varias clases

AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado parcialmente por el MEC-FEDER (REN2003-08143) y Xunta de Galicia (PGIDIT05RAG10303PR). Los autores agradecen al MEC-FEDER la concesión de una beca FPI a M.L. Rodríguez Blanco.

REFERENCIAS

- Arshad M.A., Mermut A.R. (1988). Micromorphological and physico-chemical characteristics of soil crust types in north-western Alberta, Canada. *Soil Sci.Soc.Am.J.* 52, 724-729.
- Bartès B, Roose E. (2002). Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *Catena* 47: 133-149. DOI: 10.1016/s0341-8162(01)00180-1.
- Baumhart RL, Unger PW, Dao TH. (2004). Seedbed surface geometry effects on soil crusting and seedling emergence. *Agron. J.* 96 (4): 1112-1117.
- Bresson, L. M., Boiffin, J. 1990. Morphological characterization of soil crust development stages on an experimental field. *Geoderma*. 47: 301-325.
- Bljenberg, H., Dafonte, J., Duval, Y., Govers, G., Henshall, K., Iversen, B., Kamphorst, E., Kilpelainen, J., Ludwig, B., González, A., Pitkanen, J., Sibbesen, E., Takken, I. (2000). *Effective Land Management for Surface Runoff Control*. Final Report. Project FAIR CT95-0458. Jetten, V., Guérif, J., Douglas, J. (Eds.).
- Bresson, L. M., Boiffin, J. (1990). Morphological characterization of soil crust development stages on an experimental field. *Geoderma*, 47: 301-325.
- FAO. (2006). *World Reference Base for Soil Resources 2006*. World Soil Resources Reports. No 103, FAO, Rome, Italy.
- Fernández Rueda, M. J. (1997). Características físicas y mecánicas de suelos de cultivo. Tesis Doctoral. Universidad de A Coruña. 283 pp.
- Freebairn DM, Gupta S.C, Rawls WJ. (1991). Influence of aggregate size and microrelief on development of surface soil crust. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 188-195.
- Gallardo-Carrera, A., Léonard, J., Duval, Y., Dürr, C. (2007). Effects of seedbed structure and water content at sowing on the development of soil surface crusting under rainfall. *Soil and Tillage Research*. 95: 207-217.
- 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.
- Lado Liñares, M., Diéguez Villar, A., Taboada Castro, M.M. (1999). Relación entre índices de rugosidad: Resultados de dos años de experiencias. *Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe*, 24: 141-155.
- Le Bissonnais, Y., Bruand, A., Jamagne, M. (1989). Laboratory experimental study of soil crusting: Relation between aggregate breakdown and crust structure. *Catena*, 16: 377-392.
- Le Bissonnais, Y. Cerdan, O., Lecomte, V., Benkhadra, H, Souchère, V, Martín, P. (2005). Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. *Catena*. 62: 111-124.
- Le Bissonnais, Y., Renaux, B., Delouche, H. (1995). Interactions between soil properties and moisture content in crust formation, runoff and interrill erosion from tilled loess soils. *Catena*. 25:33-46.

- McIntyre, D. S. (1958). Permeability measurements of soil crust formed by rain-drop impact. *Soil Sci.* 85: 185-189.
- Moore, D. C., Singer, M. J. (1990). Crust formation effects on soil erosion processes. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54: 1117-1123.
- Parga Pondal I. (1966). Datos geológicos y petrológicos de la provincia de La Coruña. Excm. Diputación Provincial de La Coruña.
- Robinson, D.A., Phillips, C.P. (2001). Crust development in relation to vegetation and agricultural practices, dispersive clay soils from central and southern Italy. *Soil Tillage Research.* 60: 1-9.
- Slattery, M.C., Bryan, R.B. (1992). Laboratory experiments on surface seal development and its effects on surface seal erosion processes. *J. Soil Sci.* 43:517-529.
- Truman CC, Bradford JM, Ferris JE, (1990). Antecedent water content and rainfall energy influence on soil aggregate breakdown. *Soil Soil Sci.Soc.Am.J.* 54: 1385-1392.
- Valenciano, J.B. (2003). Influencia del sistema de siembra sobre la rotura de plantas de alubia o judía (*Phaseolus vulgaris* L.) durante el periodo de emergencia del cultivo. *Rev. Fac. Agron.* 20 (3): 263-272.