

RELACIÓN ENTRE LA FACIES DE LA SUPERFICIE DE SUELOS AGRÍCOLAS Y LA FORMACIÓN DE ESCORRENTÍA EN LA ZONA DEL COMPLEJO DE ÓRDENES

Taboada Castro, M^a. M. y Paz González, A.

*Facultad de Ciencias. Universidad de A Coruña.
Campus de A Zapateira s/n. 15071. A Coruña.*

SUMMARY

Relationship between the facies of soil surface in agricultural land and runoff generation in the Complejo de Órdenes

The impact of human activity on soils is thought to have profound effects on a wide range of soil structural properties, which in turn impact on runoff and erosion. This study analyzes the evolution of soil surfaces prone to crusting. The aim is to determine which factors influence the runoff generation from agricultural land and its severity. The soil surface state was monitored after tillage on fields left bare and also on maize and grassland seedbeds. The kinetics of formation of superficial soil crusting that can prevent rainfall infiltration was evaluated. The presence of runoff was also observed. Within field variability and also between year variability for each field was high, depending on climatic and agronomic factors. The minimum diameter of the soil aggregates that are not yet incorporated into the surface crust at a given date was correlated with the cumulative rainfall. The time course evolution of aggregate minimum diameter was found to be a good index to discern between plots with different crust development velocity and therefore different sensibility for runoff production.

Key words: Tilled soil, surface evolution, crust, erosion, runoff.

RESUMEN

El impacto de la actividad del hombre sobre el suelo tiene importantes efectos sobre un amplio rango de características de la estructura del mismo, que a su vez inciden sobre la magnitud de la erosión y la escorrentía. Este trabajo analiza la evolución de la capa superficial de suelos sensibles a la formación de costra. El principal objetivo del mismo es determinar que factores influyen en la formación de un excedente de agua y en la severidad de la escorrentía a partir de parcelas agrícolas. Se registró la evolución de la superficie del suelo en parcelas labradas, pero no cultivadas, y en los lechos de siembra de parcelas dedicadas a maíz y pradera. Se estudió la cinética de formación de costra superficial, que impide la infiltración del agua de lluvia. También se observó si se generaba escorrentía. La variabilidad del estado de la superficie en el interior de cada parcela y en años sucesivos fue muy importante, dependiendo de factores climáticos y agronómicos. El diámetro mínimo de los agregados todavía no incorporados a la costra en una fecha dada y la precipitación acumulativa están correlacionados. Se puso en evidencia que la evolución a lo largo del tiempo del diámetro mínimo es un buen índice para discernir entre parcelas que presentan distinta velocidad de formación de costra y, por lo tanto, diferente sensibilidad a la producción de escorrentía.

Palabras clave: Suelo de cultivo, evolución de la superficie, costra, erosión, escorrentía.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, se admite que la deformación de la estructura del suelo es un proceso básico o general que puede ser originado por distintas causas. En efecto, en muchos estudios se ha puesto de manifiesto que determinados mecanismos de la degradación son comunes a fenómenos como la disgregación por erosión hídrica, la densificación del horizonte de laboreo y la formación de costra superficial. En consecuencia, la prevención de diferentes procesos de deformación del suelo pasan, necesariamente, por la conservación de una estructura estable (Le BISSONNAIS *et al.*, 1989; MULLINS *et al.*, 1990; KAY, 1990).

Los procesos elementales de degradación de la estructura del suelo se inician con el desprendimiento de partículas. Esta disgregación puede motivar, en algunos suelos, la formación de una costra superficial de poco espesor y muy compacta, y, en otros, el aumento de densidad y la pérdida de porosidad del conjunto del horizonte superficial, por colapso generalizado de la arquitectura del sistema poroso. Tanto el desarrollo de una costra en la superficie del suelo por acción de la lluvia como la densificación, limitan, con frecuencia, la infiltración de agua en el suelo.

De un modo simplificado, las principales modificaciones físicas inducidas por la degradación son:

- La disminución de la estabilidad estructural, lo que provoca un incremento de la susceptibilidad al desprendimiento de las partículas elementales.
- La reducción, o incluso la pérdida de permeabilidad.
- La disminución de rugosidad en superficie y, en consecuencia, de la capacidad del microrrelieve para almacenar agua temporalmente.

La liberación o desprendimiento de fragmentos de tierra y partículas elementales puede ser el resultado de distintos mecanismos como la disgregación, debida a la acción del aire atrapado durante la humectación de unidades estructurales secas, el desprendimiento de fragmentos, provocado por la energía cinética de la lluvia, la microfisuración, durante los procesos de contracción y expansión, y la dispersión, originada por procesos de naturaleza física y química.

La importancia relativa de cada uno de estos mecanismos, depende del contenido hídrico inicial y composición del suelo, por lo que la distribución de tamaño de las partículas liberadas puede variar ampliamente.

Independientemente del mecanismo de degradación, las partículas y fragmentos desprendidos provocan la disminución del espacio poroso entre los agregados y terrones, como han puesto en evidencia numerosos autores en experiencias de campo y laboratorio (HENIN et MONNIER, 1956; GOVERS and POESEN, 1988; SLATTERY and BRYAN, 1992; FIÈS et PANINI, 1995; FIÈS et CASTELAO, 1996).

Los métodos utilizados para describir la evolución a lo largo del tiempo de la superficie, bajo el impacto de las gotas de lluvia, son muy diversos y pueden clasificarse como sigue:

- 1) Estudio de la génesis de micro-horizontes.
- 2) Descripción morfológica de la evolución de la superficie.
- 3) Dinámica de las características físicas e hídricas.
- 4) Medidas de microrrelieve.

La descripción morfológica de la evolución de la superficie ha sido puesta a punto por BOIFFIN (1984) y continua siendo elaborada posteriormente por este autor y su grupo de trabajo. Este método se basa en la observación de la sensibilidad a la disgregación por acción del agua de lluvia en condiciones naturales.

Este estudio se centra en el análisis de la evolución de las características morfológicas de dos parcelas de textura media, susceptibles a la formación de costra. Se efectuaron observaciones en condiciones de campo y se relacionaron los sucesivos estadios de evolución de la superficie con algunas características morfológicas de la misma y con la precipitación acumulativa.

MATERIAL Y MÉTODOS

Los ensayos se llevaron a cabo en parcelas del Centro de Investigaciones Agrarias de Mabegondo, ubicado en San Tirso de Mabegondo (A Coruña) entre el otoño del año 1997 y finales de verano del año 2000. Se describen a continuación las características de las parcelas estudiadas, con especial referencia a las propiedades de los suelos, a la dedicación de los mismos y a las principales labores efectuadas.

Características de las parcelas estudiadas

El área estudiada ocupa una posición topográfica de pendiente suavemente inclinada y su altitud está comprendida entre aproximadamente 85 y 105 m. El material de partida está formado por esquistos básicos, pertenecientes al Complejo de Órdenes.

Se seleccionaron dos laderas divididas en diferentes parcelas experimentales, cuya denominación, dedicación agrícola y tipo de superficie inicial se consigna en la tabla 1.

En la primera ladera, situada en la zona conocida como Agra de Pardo, se estudiaron cuatro parcelas con códigos Ma 7, Ma 8, Ma 9 y Ma 11. En alguna de estas, a veces se observaron diferentes tratamientos. La mayor parte se sembraron de maíz durante los tres años estudiados, usando técnicas de cultivo convencional y posteriormente al cultivo de maíz quedaban a barbecho. Estas técnicas incluyen labores previas a la siembra (arado, encalado, abonado, gradeado y siembra) y posteriores a la misma (aplicación mecánica de herbicida y, algún año, labores de rotura de la costra desarrollada durante la fase de implantación). Los principales motivos del microrrelieve de estas superficies iniciales son la presencia de hileras de maíz cada 80 cm, surcos de fresa cada 1,60 m; después de la aplicación de herbicida, se apreciaban rodadas de tractor también cada 1,60 m. En ocasiones alguna de estas cuatro parcelas quedó todo el año a barbecho, sin cultivo de maíz, si bien en este caso se preparaban mediante una labor de fresa, de tal modo que su superficie presentaba características similares a las de un lecho de siembra. Las distintas parcelas en ciertos períodos presentaban diferencias iniciales de microrrelieve después de determinadas labores. El laboreo de las parcelas Ma 7 a Ma 11 se llevó a cabo en fechas no muy diferentes, entre los meses de Marzo y Mayo de los años estudiados.

La segunda ladera estudiada se localiza en la zona de Telleiro. Se estudió la parcela de código Ma 21 con dos tipos de suelo claramente diferenciados, Ma 21a y Ma 21b; la particularidad de la subparcela Ma 21b es que su horizonte superficial estaba formado a partir de materiales de relleno. Esta parcela se dedicó en 1997 a maíz, seguido de cereal de invierno. En 1998 se sembró de nuevo maíz y en el otoño de este año se implantó una pradera.

En la tabla 1 también se presenta una síntesis de los resultados de los análisis de los suelos en las zonas estudiadas (VALCÁRCEL ARMESTO, 1999). El contenido en materia orgánica es relativamente constante en el área de Agra de Pardo, oscilando entre 3.04 y 3.96 %. En Telleiro, por contra, varía notablemente entre las dos subparcelas (2.03 en Ma 21b y 5.88 en Ma 21a), lo que resulta coherente con los datos obtenidos en otros trabajos que estudiaron suelos procedentes de la misma área y con el hecho de que el horizonte superior de la parcela con menos materia orgánica procede de materiales de relleno.

Zona	Código	Rotación	M.O.(%)	Arena	Limo	Arcilla
Agra de Pardo	Ma 7	Maíz-barbecho	3.04	27.97	59.37	12.66
“	Ma 8	“	3.62	32.38	52.75	14.87
“	Ma 9	“	3.42	23.93	60.34	15.73
“	Ma 11	“	3.96	25.46	58.66	15.88
Telleiro	Ma 21a	Maíz-pradera	5.88	34.47	45.59	19.94
“	Ma 21b	“	2.03	28.81	61.58	9.61

Tabla 1. Identificación y características generales de las parcelas estudiadas.

La textura de Agra de Pardo, franco-limosa, también es muy homogénea. Predomina la fracción limo, con contenidos que oscilan entre 52.7 % y 60.3 %. Las mayores diferencias relativas se aprecian, sin embargo, entre los valores máximos (23.3 %) y mínimos (17.6 %) de arcilla. Estos suelos pueden presentar, a priori, una sensibilidad alta a la formación de costra, debido a los bajos contenidos de arcilla e importantes proporciones de limo. En Telleiro el contenido en arcilla de la zona más pobre en materia orgánica es claramente inferior al del área con más materia orgánica.

La finca experimental del Centro de Investigaciones Agrarias de Mabegondo dispone de una estación climatológica en la que se registran las siguientes variables: precipitación, temperatura máxima y mínima y humedad relativa. En la figura 1 se puede observar el diagrama de precipitación diaria durante el periodo en que se efectuaron ensayos de campo. Se comprueba la importancia de la variabilidad interanual de las precipitaciones diarias. Los máximos a escala diarios se registraron durante 1998 a finales de la primavera, y en 1999 a comienzos de primavera y en el otoño.

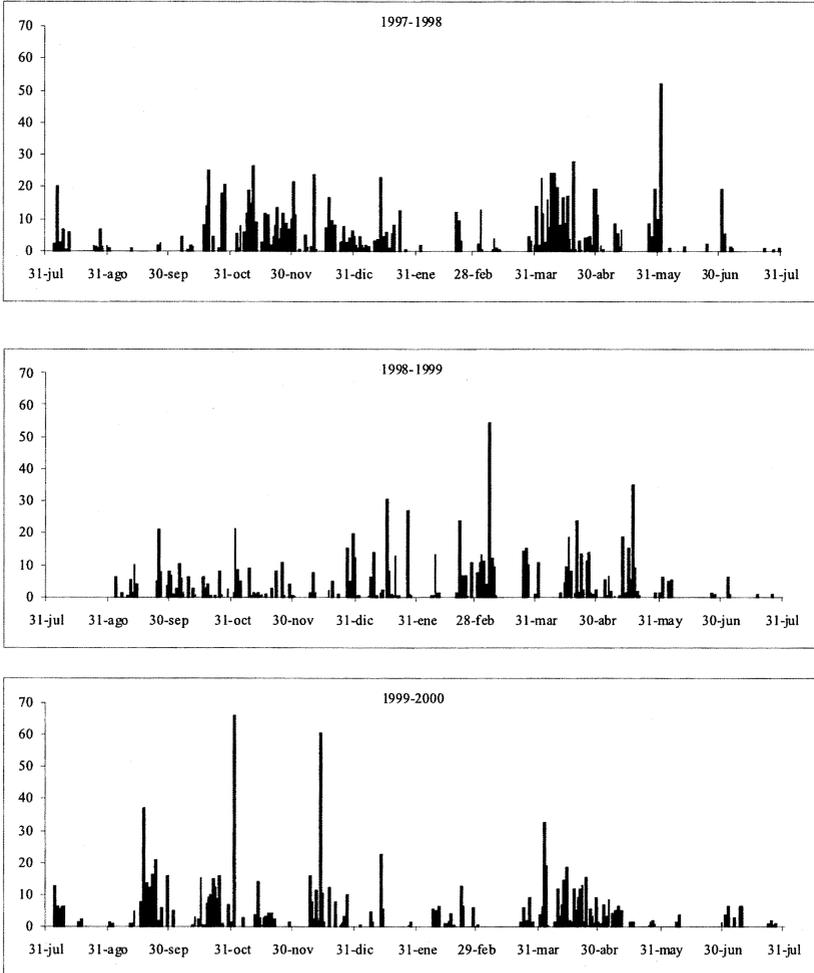


Figura 1. Diagrama de las precipitaciones diarias en Mabegondo entre el día 1 de agosto de 1997 y el 31 de julio de 2000.

Por otra parte, se observan importantes diferencias entre las precipitaciones de los períodos en que la cobertura vegetal es más escasa, como son la primavera (siembra de maíz) y el otoño (siembra de pradera).

Descripción de la evolución de la superficie

Se realizaron periódicamente descripciones del estado de la superficie del suelo mediante estimación visual de los cambios que en ella se producen en todas las parcelas de cada una de las dos zonas estudiadas. Esta estimación se hizo siguiendo unas claves de referencia previamente descritas (TABOADA CASTRO, 1998) y se acompañó de tomas fotográficas.

En síntesis, la clave que se utilizó para la descripción tiene en cuenta un conjunto de parámetros que permiten evaluar la importancia de la degradación de diversas características de la estructura del suelo:

- 1) Estado de la superficie del suelo tanto en las rodadas como entre las rodadas. Se observa si la costra inicial (F0) ha evolucionado hasta la facies estructural (F1) o hasta la sedimentaria (F2), así como diversas facies intermedias. También se anotó el porcentaje de superficie que ocupa cada una de las facies descritas.
- 2) Diámetro mínimo de los agregados que todavía no han sido incorporados a la costra. Este parámetro puede presentar correlaciones elevadas con la infiltrabilidad. Se mide en mm, hasta un máximo de 20 mm.
- 3) Tipo de rugosidad, determinado perpendicular y paralelamente a la dirección del laboreo. El rango de escalas utilizado se extiende desde R0 hasta R5 .
- 4) Densidad de macroporos, que intervienen en la infiltración. Los códigos extremos usados en la descripción son P3 (más de 100 poros/m²) y P0 (sin poros).
- 5) Grietas, estimando visualmente su densidad y profundidad.
- 6) Humedad de la superficie, considerando si está saturada, húmeda, o seca (expresada en porcentaje).
- 7) Distancia máxima alcanzada por la escorrentía, estimada visualmente. La escala inferior, con ausencia de desplazamiento (R00) y la superior con desplazamiento a escala hectométrica (R05).

Por tanto, la descripción morfológica del estado de la superficie proporciona no solo información sobre la evolución de las facies fundamentales F0 (estado inicial), F1 (costra estructural) y F2 (costra sedimentaria) que se desarrollan progresivamente bajo la acción del agua de lluvia, sino también series de datos semicuantitativos de utilidad para evaluar la susceptibilidad a la formación de arroyada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las observaciones semicuantitativas efectuadas en las 4 parcelas de Agra de Pardo en las que se siguió la rotación maíz/barbecho, con código Ma 7, Ma 8, Ma 9 y Ma 11, que se presentan en la tabla 1, permiten comparar la evolución de superficies con rugosidades iniciales muy diferentes. En efecto, habitualmente en estas parcelas se efectúa en fechas muy tempranas, (normalmente en febrero, aunque en Agra de Pardo se labró a finales de enero de 2000), una labor con arado de vertedera. Esta labor genera un importante microrrelieve, en el que la mayor parte de las depresiones, observadas en la dirección paralela a la del laboreo, son del orden de 5 a 10 mm (clase R3), incluso más profundas. Posteriormente, ya avanzada la primavera se efectúan labores como las de gradeado de las que resultan superficies iniciales con rugosidades menos importantes. Finalmente, en mayo se lleva a cabo la siembra del maíz, lo que origina superficies de rugosidad muy débil (R1 e incluso R0). En años sucesivos la rugosidad inicial del lecho de siembra puede ser diferente, como se comprueba comparando las descripciones de rugosidad en la dirección paralela a la de laboreo en 1998 y 1999.

Del mismo modo, en la tabla 4 se puede comprobar que la rugosidad inicial en una de las subparcelas de la finca de Telleiro, con código Ma 21a, dedicada a maíz en 1998 y posteriormente a pradera, también presenta estados iniciales con rugosidades en la dirección paralela al laboreo que oscilan entre las clases R0-R1, para el lecho de siembra y R3, después del arado profundo con vertedera.

En las sucesivas operaciones de laboreo, la precipitación provoca la evolución de la superficie del suelo. Esta evolución afecta a superficies con distinto grado de rugosidad inicial. En la foto 1 se compara el aspecto de una superficie rugosa, después del arado con vertedera al comienzo de la primavera, con otra evolucionada a partir de la misma por acción de la lluvia, observada antes de la siembra de maíz.

La observación del estado de la superficie del suelo a lo largo del tiempo permite apreciar, por un lado, la degradación de la misma y por otro efectuar una caracterización de la forma predominante de escorrentía. La velocidad e intensidad de degradación del estado de la superficie vienen determinados por factores climáticos, edafológicos y agronómicos. De ahí la necesidad de analizar las interacciones entre los mismos.



**Foto 1. Aspecto de la superficie del suelo en la parcela Ma 9.
Superior: estado inicial. Inferior: estado evolucionado.**

Los resultados de las observaciones semicuantitativas efectuadas en la parcela Ma 9 de Agra de Pardo se presentan en las tablas 2 y 3.

Fecha	P (mm)	Estado superficie	D.min (mm)	Rugosidad		Poros (n°/m ²)	Grietas (m/m ²)	Humedad (%)	Escorrenría
				Paralela	Perpendicular				
<i>Fresado para preparar el lecho de siembra / Siembra manual</i>									
15-05-97	0	F0	<1	R1-R2	R2-R3	P3	0	0	R00
20-05-97	27.6	F1+	3	R1-R2	R2-R3	P3	0	0	R00
23-05-97	30.9	F1+; F2	4	R1-R2	R2-R3	P3	1	100	R00
28-05-97	88.4	F2; F2+	18	R1-R2	R2-R3	P2-P1	0	100	R04-05
12-06-97	174.2	F2+	>20	R0-R1-R2	R2-R3	P1-P0	7	70	R04-05
<i>Abono de cobertera. Destrucción de costra</i>									
08-07-97	0	F0	<1	R2	R4-R3	P3	0	0	R00
17-07-97	5.4	F0+	2	R2	R4-R3	P3	0	40	R00
09-08-97	38	F1; F1+	3	R2	R4-R3	P3-P2	1	90	R00
01-10-97	63	F2-	7	R2	R4-R3	P3-P2	0	0	R02
<i>Recolección/Barbecho</i>									
<i>Gradeada/Arada</i>									
06-02-98	0	F0	1	R3	R4	P3	0	20	R00
12-02-98	0	F0	1	R3	R4	P3	0	5	R00
27-02-98	24.7	F1-	2	R3	R4	P3	0.25	95	R00
12-03-98	45.5	F1+; F1/2-	4	R3-R2	R4	P3-P2	0	100	R01
30-03-98	53.5	F1+; F1/2-	5	R3-R2	R4	P3-P2	1	100	R01
02-04-98	70.7	F1+; F1/2-	6	R2	R4-R3	P3-P2	0	100	R01
13-04-98	228.2	F2-; F2	18	R2	R3	P2-P1	0	100	R02
30-04-98	358.6	F2	>20	R2-R1	R3	P1	0	100	R03
01-05-98	371.4	F2-; F2+	>20	R2-R1	R3	P1-P0	0	100	R03
<i>Abonado/Herbicida/Gradeado</i>									
<i>Fresado para preparar el lecho de siembra / Siembra manual</i>									
15-05-98	0	F0	<1	R1-R0	R3	P3	0	0	R00
28-05-98	12.9	F0+	2.5	R1-R0	R3	P3	0	100	R00
01-06-98	94.3	F1/2+	13	R1-R0	R3	P2	0	100	R02
05-06-98	94.5	F1/2+	14	R1-R0	R3	P2	0.25	60	R02
<i>Abono de cobertera. Destrucción de costra</i>									
10-07-98	0	F0	<1	R2	R4	P3	0	0	R00
14-07-98	0	F0	<1	R2	R4	P3	0	0	R00
27-07-98	1.4	F0+	<1	R2	R4	P3	0	0	R00
10-08-98	2.3	F1-	<1	R2	R4	P3	0	0	R00
08-09-98	10.8	F1-; F1	1.5	R2-R1	R4	P3	0	15	R00
05-10-98	98.4	F1/2+	3	R2-R1	R4	P2-P1	0	100	R01
28-10-98	136.4	F2-	10	R1-R0	R4-R3	P1	0.25	0	R01
<i>Recolección/ Barbecho</i>									

Tabla 2. Descripciones morfológicas de la parcela Ma 9 durante las labores preparatorias y el cultivo de maíz en 1997 y 1998 y la etapa a barbecho entre ambas.

Los datos se han agrupado considerando secuencias de evolución después de cada operación agrícola que haya modificado sensiblemente la superficie del suelo, originando un nuevo estadio inicial permeable y poroso.

Fecha	P (mm)	Estado superficie	D.min (mm)	Rugosidad		Poros (n°/m²)	Grietas (m/m²)	Humedad (%)	Escorrenría
				Paralela	Perpendicular				
<i>Gradeado/ Arado</i>									
08-02-99	0.4	F0	1	R2-R3	R2-R3	P3	0	30	R00
12-02-99	16.7	F0+; F1-	1.5	R2-R3	R2-R3	P3	0.25	100	R00
19-02-99	16.7	F1+	2	R2	R2-R3	P3	0.75	70	R01
01-03-99	71.7	F1+; F1/2-	4	R2	R2-R3	P3-P2	0.5	100	R02
12-03-99	196.2	F2+	>20	R0-R1	R2-R3	P1-P0	2.5	100	R03
08-04-99	247.7	F2+	>20	R0-R	R2-R3	P1-P0	1	0	R03
<i>Abonado/Herbicida/Gradeado</i>									
<i>Fresado para preparar el lecho de siembra / Siembra manual</i>									
03-05-99	0	F0	<1	R2	R3	P3	0	0	R00
14-05-99	35.3	F1-	2	R1-R2	R3	P3	0	0	R00
19-05-99	100.5	F1/2	6	R1-R2	R3	P3-P2	0	100	R02
02-06-99	111.3	F2-	18	R1-R2	R3	P2-P1	1.5	30	R02
10-06-99	121.5	F2	20	R1-R2	R3	P1-P2	1.25	0	R02
<i>Abono de cobertura. Destrucción de costra</i>									
30-06-99	0	F0	<1	R2	R2-R3	P3	0	0	R00
26-07-99	8.3	F0+	1	R2	R2-R3	P3	0	0	R00
12-08-99	45.9	F1-; F1	3	R2	R2-R3	P3	0	30	R00
03-09-99	51.2	F1-; F1	4	R2	R2-R3	P3	0	0	R00
29-09-99	207	F2-; F2; F2+	16	R2	R2-R3	P3	0	0	R02
<i>Recolección/Barbecho</i>									
<i>Gradeada/Arada</i>									
25-01-00	0	F0	1	R2-R3	R4-R5	P3	0	50	R00
10-03-00	52.4	F1	5.5	R2-R3	R4-R5	P3	0	20	R00
22-03-00	53.5	F1 a F1+	7.5	R2-R3	R4-R5	P3	0.25	0	R01
<i>Fresado para preparar el lecho de siembra / Siembra manual</i>									
15-05-00	0	F0	<1	R0-R1	R3	P3	0	0	R00
18-05-00	2.8	F0+	0.5	R0-R1	R3	P3	0	0	R00
26-05-00	4.8	F1-	1.5	R0-R1	R3	P3	0.25	15	R00
<i>Abono de cobertura. Destrucción de costra</i>									
22-06-00	0	F0	<1	R1-R2	R3	P3	0	0	R00
26-06-00	2	F0+	<1	R1-R2	R3	P3	0	0	R00
13-07-00	36.9	F0+ a F1-	2.5	R1-R2	R3	P3	0	0	R00
18-08-00	51.9	F1-	3	R1-R2	R3	P3	0	50	R01
26-09-00	193.3	F1/2-	4	R1-R2	R3	P3-P2	0	100	R02
<i>Recolección</i>									

Tabla 3. Descripciones morfológicas de la parcela Ma 9 durante las labores preparatorias y el cultivo de maíz en 1999 y 2000 y la etapa a barbecho entre ambas.

Del mismo modo los resultados de las observaciones semicuantitativas en la subparcela Ma 21a de Telleiro se presentan en la tabla 4. En este caso se consideran diversas secuencias de evolución antes y durante un cultivo de maíz y la posterior implantación de una pradera.

Fecha	P (mm)	Estado superficie	D.min (mm)	Rugosidad		Poros (n°/m ²)	Grietas (m/m ²)	Humedad (%)	Escorrentía
				Paralela	Perpendicular				
<i>Tratamiento anterior: Gradeado. Barbecho</i>									
14-10-97	0	F0	<1	R3	R3	P3	0	0	R00
30-10-97	90.8	F1/2-	5	R2-R3	R3	P1	0.25	100	R01
12-11-97	187.4	F1/2+	6	R2-R3	R3	P2	0	100	R02
<i>Fresado/Arado</i>									
30-03-98	0	F0	<1	R3	R4-R5	P3	0	100	R00
02-04-98	17.2	F1-	2	R3	R4-R5	P3	0.75	100	R00
06-04-98	70.3	F1- a F1	7	R3	R4-R5	P3	0	100	R01
13-04-98	174.7	F1/2	10	R3	R4-R5	P2-P3	0	100	R03
30-04-98	30.54	F1/2+	15	R3	R4-R5	P2-P3	0	100	R03
01-05-98	316.1	F2-	20	R2	R4-R5	P2-P1	0	100	R03
<i>Encalado/Gradeado</i>									
21-05-98	0	F0	<1	R0-R1	R2-R3	P3	0	0	R00
26-05-98	0	F0	<1	R0-R1	R2-R3	P3	0	0	R00
28-05-98	12.9	F0+	1.5	R0-R1	R2-R3	P3	0	0	R00
05-06-98	94.5	F2	>20	R0-R1	R2-R3	P2	0.25	30	R02
<i>Siembra</i>									
10-06-98	0	F0	<1	R1-R2	R3	P3	0	0	R00
13-06-98	1.2	F0+	<1	R1-R2	R3	P3	0	5	R00
25-06-98	3.6	F0+	1.5	R1-R2	R3	P3	0	0	R00
05-07-98	46.6	F1+, F1/2-	6	R1-R2	R3	P3	0.5	100	R02
<i>Abono de cobertura. Destrucción de costra</i>									
16-07-98	0	F0	<1	R1-R2	R3	P3	0	0	R00
17-07-98	0	F0	<1	R1-R2	R3	P3	0	0	R00
27-07-98	1.4	F0+	<1	R1-R2	R3	P3	0	0	R00
10-08-98	2.3	F0+, F1-	<1	R1-R2	R3	P3	0	0	R00
19-08-98	2.3	F0+, F1-	<1	R1-R2	R3	P3	0	0	R00
25-08-98	2.3	F0+, F1-	<1	R1-R2	R3	P3	0	0	R00
27-08-98	2.3	F0+, F1-	<1	R1-R2	R3	P3	0	0	R00
02-09-98	2.3	F0+, F1--	<1	R1-R2	R3	P3	0	0	R00
03-09-98	2.8	F0+, F1-	<1	R1-R2	R3	P3	0	0	R00
08-09-98	10.8	F1+	2	R1-R2	R3	P3	0	5	R00
05-10-98	98.4	F1/2; F2	3	R1-R2	R3	P2-P3	0	100	R03
13-10-98	115.1	F2; F2+	14	R0-R1	R3	P2-P1	0	0	R03
28-10-98	136.4	F2; F2+	20	R0-R1	R3	P1	0	0	R03
<i>Recolección</i>									
<i>Siembra de pradera</i>									
29-10-98	2.7	F0	<1	R0	R1-R2	P3	0	100	R00
02-11-98	25.2	F1+	3.5	R0	R1-R2	P3-P2	0	100	R02
06-11-98	38.8	F1/2-; F2-	3	R0	R1-R2	P2-P1	0	100	R02
12-11-98	50	F2-	4	R0	R1-R2	P2-P1	0	100	R03
11-12-98	93.8	F2; F2+	18	R0	R0-R1	P2-P1	0.5	100	R03
28-12-98	118	F2+	>20	R0	R0-R1	P1-P0	0	100	R03
13-01-99	180.1	F2+	>20	R0	R0-R1	P1-P0	0	100	R03
26-01-99	262	F2+	>20	R0	R0-R1	P1-P0	0	100	R03
03-02-99	262.9	F2+	>20	R0	R0-R1	P1-P0	0	100	R03
<i>Pradera dedicada a forraje y a pastoreo desde 1998 hasta 2001</i>									

Tabla 4. Descripciones morfológicas de la parcela Ma 21a dedicada a maíz en 1999 y posteriormente a pradera.

Estudios previos (BOIFFIN, 1984; MONNIER *et al.*, 1986) han puesto de manifiesto que en zona templado-húmeda el riesgo de escorrentía de los terrenos agrícolas, para una parcela y un año determinado, dependen tanto de la cantidad e intensidad de la precipitación, como de un estado de degradación de la superficie del suelo, que determine la génesis de un excedente de agua. En estas condiciones de precipitaciones débiles o moderadas, se aprecia que con frecuencia la escorrentía y la erosión son de tipo difuso. La causa que origina este tipo de escorrentía es la degradación de la estructura en las zonas ocupadas por las microdepressiones del terreno hasta tal punto que no permite la infiltración total del agua de lluvia y el excedente de agua forma pequeñas charcas; la conexión entre pequeñas depresiones vecinas origina escorrentía y desplazamiento de partículas. Por el contrario, la erosión concentrada, que motiva pérdidas de suelos más elevadas, es menos frecuente y requiere una mayor energía cinética para superar el umbral de incisión en la superficie del suelo.

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten, en primer lugar, poner de manifiesto relaciones empíricas entre el estadio morfológico de la costra y la precipitación acumulativa. Previamente se había establecido que con una precipitación acumulativa de 50 mm, suelos del área de Mabegondo ya han formado una costra estructural (TABOADA CASTRO *et al.*, 1999). En las secuencias de evolución aquí estudiadas la facies F1 (o la F1+) se alcanzó con las siguientes cantidades de precipitación: 27.6 mm, 38.0 mm, 45.5 mm, 10.8 mm, 16.7 mm, 45.9 mm, 52.4 mm, 70.3 mm, 46.6 mm, 10.8 mm y 25.2 mm. En algunos casos las observaciones fueron tan poco frecuentes o las precipitaciones en períodos cortos de tiempo tan importantes, que no fue posible conocer la cantidad de lluvia acumulada que correspondía al desarrollo de esta facies. La cantidad máxima para el desarrollo de una facies F1 se registró en una parcela con un elevado contenido en materia orgánica, después de una labor profunda con arado de vertedera. Por ello continúa siendo válido el límite de los 50 mm, como un umbral en el que no solo todos los lechos de siembra observados en esta campaña y en campañas anteriores, sino también la mayor parte de las superficies con microrrelieve inicial rugoso han desarrollado totalmente una costra estructural. La importancia de este umbral queda de manifiesto si se tiene en cuenta que sobre las superficies lisas ya se puede generar un excedente de agua cuando se alcanza la facies estructural.

Por lo que respecta a la precipitación necesaria para la formación de una facies sedimentaria, TABOADA CASTRO *et al.* (1999) encontraron que oscilaba entre 150 y 200 mm para superficies finas. En la tabla 2 se incluyen, a efectos de comparación con el período 1998-2000 objeto de este trabajo, datos del año 1997 en Agra de Pardo, pudiendo apreciarse que con 174.2 mm se había alcanzado ya la facies F2. En 1999 con 121.5 mm de precipitación acumulativa desde la siembra se alcanzó también la facies F2. Por el contrario, en 1998 y 2000 no se observó en Agra de Pardo el estadio evolutivo F2, debido a la pequeña cantidad de precipitación entre la siembra y las labores de abonado de cobertera y de rotura de la primera costra. En Telleiro tampoco se observó el estadio F2 en el lecho de siembra de maíz durante 1998, pero si se pudo apreciar al final del ciclo vegetativo del maíz, en la nueva secuencia que se inició con la rotura de la costra inicial durante el abonado y por labores secundarias; en esta parcela se observó el estadio F2 durante la implantación de la pradera en el otoño de este año con solamente 93.8 mm de precipitación acumulativa desde la siembra.

Las superficies rugosas obtenidas en los primeros meses del año por arado de vertedera evolucionaron hasta el estadio F2 durante algunos de los años considerados. La cantidad de precipitación acumulativa con la que se observó esta facies fue también variable. En Agra de Pardo, se cifró en 228.2 mm durante 1998 y 196.2 mm durante 1999; en el año 2000 la parcela estudiada se labró a finales de enero, pero el tiempo relativamente seco en los dos meses siguientes determinó una evolución menos intensa que en años anteriores. Por lo que respecta a la subparcela Ma 21a de Telleiro, en los primeros meses de 1998 se pudo apreciar como 316.1 mm de precipitación acumulativa, después de una labor de arado de vertedera, no eran suficientes para alcanzar el estadio F2; por el contrario, a continuación se efectuó un gradeado y se pudo observar que la superficie resultante evolucionó hasta formar una costra sedimentaria con 94.5 mm de precipitación acumulativa.

La influencia del régimen de precipitación sobre la evolución de la superficie del suelo se puede apreciar en la figuras 1 y 2, en las que se representa el diámetro mínimo de los agregados no soldados en función de la precipitación acumulativa. Los datos se refieren a las parcelas Ma 9 y Ma 21a, y corresponden a diferentes períodos de evolución en años sucesivos. Se comprueba que el patrón de evolución dentro de cada parcela varía para cada superficie inicial considerada; no obstante las sucesivas cinéticas de evolución presentan algunas similitudes.

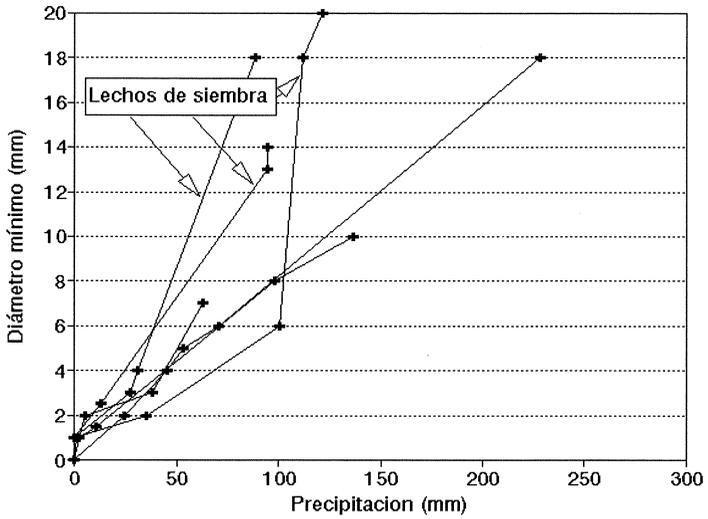


Figura 1. Diámetro mínimo versus precipitación en Agra de Pardo (Ma 9).

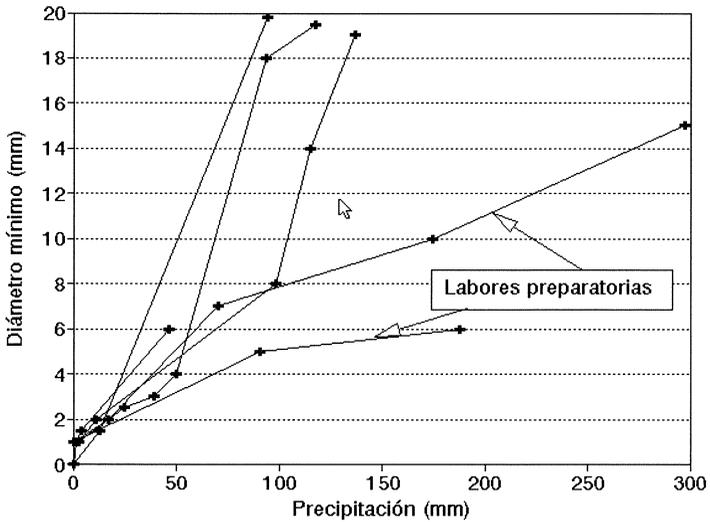


Figura 2. Diámetro mínimo versus precipitación en Telleiro (Ma 21a).

En todo caso, para poder interpretar la evolución del diámetro mínimo conviene tener presente que entre las fuentes de variabilidad de las que ésta depende hay que considerar no solo la susceptibilidad del suelo a la formación de costra, sino también la rugosidad de la superficie inicial, la humedad antecedente de la superficie del suelo, el régimen de precipitación, la presencia o ausencia de cobertura vegetal, etc.

Se pueden apreciar notables diferencias en cuanto a la velocidad de evolución dentro de cada parcela y entre las dos parcelas, que cabe atribuir a los factores de variación antes reseñados. En los casos discutidos en este trabajo se prestará particular atención al efecto de la rugosidad inicial, dado que se dispone de datos referidos a lechos de siembra finos, que contrastan con microrrelieves muy gruesos producidos por labores con arado de vertedera. En general, la dispersión de los datos representados en las figuras 1 y 2 aumenta en función de la precipitación acumulativa. Ello pone en evidencia que las diferencias de diámetro mínimo entre los sucesivos episodios de evolución de las dos parcelas estudiadas son poco importantes en los primeros estadios y se van incrementando conforme se desarrolla la costra superficial. Este resultado es similar al encontrado previamente en suelos de la misma área, uno de los cuales había alcanzado ya una degradación importante por fenómenos erosivos (TABOADA CASTRO *et al.*, 1999).

Por otra parte en las etapas avanzadas de formación de una costra, es cuando se consideran más imprecisas las determinaciones semicuantitativas efectuadas en el campo (BOIFFIN, 1984). El hecho de que en las tablas 2, 3 y 4 y durante determinadas fechas de observación se consigne más de un índice para un mismo parámetro (por ejemplo R0-R1 para la rugosidad) se debe a la imprecisión de las determinaciones, debido al carácter semicuantitativo de las mismas.

Los datos de las tablas 2, 3 y 4 y de las figuras 1 y 2 permiten atribuir algunas de las diferencias de la velocidad de degradación de las superficies estudiadas al microrrelieve inicial. En la figura 1 se aprecia que las superficies relativamente lisas como son los lechos de siembra de la parcela Ma 9 en Agra de Pardo presentan una tendencia a evolucionar con mayor rapidez que las restantes superficies representadas, entre las que se encuentran las obtenidas por labores como las de arado de vertedera y gradeado. En la figura 2, con datos de la subparcela Ma 21a, en Telleiro, se han destacado aquellas

superficies que evolucionan más lentamente y que corresponden a microrrelieves iniciales muy rugosos, como los obtenidos por arado de vertedera. En Telleiro se observó una evolución más rápida de la superficie en la subparcela Ma 21b (datos no presentados en este trabajo), lo que cabe atribuir a su menor contenido en materia orgánica, en comparación con el de la Ma 21a, como ya ha sido discutido en un trabajo previo (TABOADA CASTRO *et al.*, 1999).

Si se considera la evolución del diámetro mínimo de los agregados de la superficie del suelo en función del tiempo, se comprueba que está relacionada, en primer lugar, con el régimen de precipitaciones, como también ya se había puesto de manifiesto en un anterior trabajo (TABOADA CASTRO *et al.*, 1999). Se puede considerar, por ejemplo, la secuencia de evolución que se inicia en el tratamiento Ma 9 con fecha de 16-07-98 en la que se aprecia que el diámetro mínimo fue inferior a 1 mm durante un período de dos meses, debido tanto a la débil cantidad e intensidad de la precipitación como al efecto de la cubierta vegetal; más adelante, sin embargo, el diámetro mínimo alcanzó 20 mm en un intervalo menor de tiempo a pesar de que se mantuvo la cobertura vegetal.

Por lo que respecta a la evolución de la rugosidad, se pudo observar claramente dos efectos muy generales. En primer lugar conviene considerar las diferencias sistemáticas entre las determinaciones efectuadas paralela o perpendicularmente a la dirección de laboreo del suelo, que se aprecian tanto en las superficies más rugosas como en los lechos de siembra; la rugosidad paralela esta más bien relacionada con la disposición aleatoria de agregados y terrones sobre la superficie, mientras que la rugosidad perpendicular, o rugosidad orientada, está generada por estructuras de origen agrario formadas sistemáticamente al cultivar el suelo, como los surcos (ALLMARAS *et al.*, 1966). En segundo lugar se comprueban las diferencias iniciales de rugosidad (aleatoria y orientada) entre los lechos de siembra y las restantes superficies con microrrelieve más desarrollado.

Al analizar la evolución de la rugosidad frente a la precipitación, se constata que la rugosidad perpendicular tiende a mantenerse relativamente constante, mientras que la paralela es más sensible al efecto de la degradación por la energía cinética del agua de lluvia. Con todo, en algunas secuencias de evolución en las que el diámetro mínimo de los agregados llega a superar los

20 mm, la rugosidad inicial y final, medida paralelamente a la dirección de laboreo, se adscribió a la misma clase; ello pone en evidencia que las clases de rugosidad consideradas son poco sensibles para describir los fenómenos de encostrado.

La porosidad de las superficies iniciales se incluye en la clase P3, con más de 100 poros/m². Por el contrario al desarrollarse una costra sedimentaria el número de poros es generalmente inferior a 10 poros/m² o incluso no se observan en absoluto poros, por lo que les corresponde la clase P1-P0 o P0. La reducción de la porosidad se observa tanto en los lechos de siembra como en las superficies iniciales muy rugosas. La porosidad se comporta de un modo similar a como lo hace la rugosidad paralela, cuando se considera como descriptor del encostrado, mostrándose ambos índices como menos sensibles que el diámetro mínimo. En este sentido, es necesario reseñar que en alguna de las series, (como por ejemplo en la parcela Ma 9 durante el año 1999, después del abonado y la rotura de la costra inicial) la porosidad, al igual que la rugosidad paralela no evolucionaron en absoluto, mientras que el diámetro mínimo ascendió a 16 mm. La cantidad de precipitación a partir de la cual se observó la clase de porosidad P1 fue muy variable, siempre más elevada que 120 mm.

Una vez más, se puso de manifiesto la escasa importancia de las grietas de retracción de este suelo, en el que predominan arcillas no expansibles. En las dos parcelas estudiadas, la densidad del sistema de grietas durante su máximo desarrollo, a lo largo de los años 1998, 1999 y 2000, se estimó en una cifra de 2.5 m/m², si bien durante la mayor parte de las observaciones no se detectaron. En 1997 se habían contado 7 m/m² de grietas (tabla 2) en la parcela Ma 9, lo que representa una cifra similar al máximo de 5-6 m/m², que figura en otro trabajo sobre suelos de la misma zona (TABOADA CASTRO *et al.*, 1999).

Muchas de las observaciones se efectuaron en dos estados extremos de humedad, es decir con 0% o 100% de la superficie húmeda. Las primeras son más frecuentes en la primavera y el verano y las segundas en la estación húmeda. El estado de humedad del suelo interviene en la intensidad de la disgregación y por lo tanto en la velocidad de la formación de costra. Este efecto es más importante en los primeros estadios de evolución de una superficie inicial (Le BISSONNAIS *et al.*, 1989; TABOADA CASTRO *et al.*, 1999).

La escorrentía difusa y concentrada había sido muy importante en el año 1997. A finales de la primavera de este año, poco después de la siembra del maíz, se originaron pérdidas de suelo por formación de surcos y cárcavas efímeras en Agra de Pardo. Se pudo comprobar que, con frecuencia, los surcos se formaban a favor de motivos lineales de origen agrario como las rodadas de tractor y las hileras de siembra del maíz. Mientras tanto, además de los fenómenos de erosión concentrada, en la zona entre regueros del interior de las parcelas se observaron desplazamientos decamétricos (R04), poniendo de manifiesto la importancia de la erosión difusa al lado de los de erosión concentrada.

Por el contrario, en 1998, 1999 y 2000 no se observó erosión concentrada en las parcelas de Agra de Pardo. En Telleiro, es necesario diferenciar entre las subparcelas Ma 21a, sin erosión concentrada, y la Ma 21b, no descrita en este trabajo, en la que se formó una cárcava efímera en 1998 durante el cultivo de maíz que se reactivó posteriormente en diversas ocasiones bajo pradera. De los datos consignados en las tablas 2, 3 y 4 se infiere que durante estos tres años los desplazamientos de partículas en Agra de Pardo y la subparcela Ma 21a de Telleiro en los períodos de mayor desarrollo de la costra se limitaron a una escala de unos pocos metros, en el interior de las parcelas.

Conviene insistir en el hecho de que de estas observaciones se excluyen los motivos lineales de origen agrario como surcos de fresadora, rodadas de tractor, hileras de siembra, etc. Las descripciones relativas a rodadas de tractor y otros motivos lineales (no presentadas) difieren notablemente del modelo descrito en las tablas 2 a 4. En general, en ellas se aprecia una degradación más rápida de la superficie del suelo. Dicho de otro modo, sobre estos motivos desarrollados por los aperos de labranza se observa costra sedimentaria antes que en el resto de la parcela, y cabe destacar además la soldadura rápida de los fragmentos de menor tamaño de modo que el diámetro mínimo de los agregados no soldados crece más rápidamente que en las zonas no afectadas por rodadas. En efecto, inicialmente, en el estadio F0, las rodadas se caracterizan por una proporción de tierra fina más importante que las zonas vecinas y un índice de rugosidad muy débil, que corresponde a la clase R1 ó R0 sin apenas terrones ni agregados de dimensiones centimétricas. En estas condiciones la distancia que alcanza el desplazamiento por escorrentía es de, al menos, un orden de magnitud superior al que corresponde a las zonas de observación entre las rodadas y otros motivos lineales. De hecho, durante los

tres años estudiados se observaron desplazamientos de varias decenas de metros en las cuatro parcelas estudiadas de Agra de Pardo, así como en la subparcela Ma 21a de Telleiro.

De las anteriores observaciones se desprende que si bien en 1998, 1999 y 2000 no se observó incisión por erosión concentrada, la escorrentía difusa fue un fenómeno generalizado. Este tipo de erosión originó desplazamientos y redistribución de cantidades limitadas de materiales en el interior de las parcelas, de escasa magnitud, así como el transporte de los mismos a favor de rodadas y surcos preexistentes y su deposición en las zonas en donde disminuía la pendiente.

Los resultados precedentes confirman la relación entre el estadio morfológico de la costra y la precipitación acumulativa y también la dispersión de la misma, en función de factores climáticos, agronómicos y edafológicos. En todas las parcelas estudiadas la superficie evolucionó de tal modo que se apreciaron síntomas de escorrentía más o menos intensa a favor de los surcos de laboreo y rodadas de tractor, pero entre los surcos los desplazamientos máximos fueron inferiores a los 10 m. Una base de datos amplia con resultados como los presentados en este trabajo, debe de permitir establecer relaciones entre la susceptibilidad de la superficie del suelo a la génesis de escorrentía y el estadio de evolución de la misma para la gama de características agronómicas de la zona estudiada.

CONCLUSIONES

De los datos semicuantitativos obtenidos en ensayos acerca de la evolución de la superficie del suelo en parcelas de textura media con diferentes rotaciones, se deducen las conclusiones siguientes:

- 1) Las superficies estudiadas pueden ser consideradas como susceptibles al desarrollo de una costra. Este fenómeno se observó a lo largo de tres años sucesivos, con diferente régimen climático y ocurrió varias veces a lo largo del año.
- 2) Entre las sucesivas operaciones de laboreo se desarrolla una secuencia de evolución típica de la superficie, desde el estadio inicial, que origina una costra estructural y, si la cantidad de lluvia es suficiente, una costra sedimentaria.

- 3) Se ha puesto de manifiesto la influencia sobre la cinética de evolución de factores como la rugosidad de la superficie inicial, la composición del suelo y la presencia de cobertura vegetal.
- 4) Se constató que, en las condiciones experimentales del presente estudio, la formación de costra estructural ocurre con cantidades inferiores a 50 mm de precipitación acumulativa. La cantidad de precipitación requerida para la formación de una costra sedimentaria, generalmente es superior a 150 mm, pero osciló entre cifras del orden de 120 y 200 l de agua.
- 5) La cinética de evolución de la relación entre el diámetro mínimo de los agregados no soldados versus precipitación acumulada es un índice de la velocidad de formación de costra para cada una de las situaciones estudiadas.

AGRADECIMIENTOS: Este trabajo ha sido financiado en parte por la Xunta de Galicia (proyecto PGIDT 99MA10303).

BIBLIOGRAFÍA

ALLMARAS, R. R., BURWELL, R. E., LARSON, W. E. and HOLT, R. F. 1966. Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage. USDA Conserv. Res. Rep., 7. 22 pp.

BOIFFIN, J. 1984. *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*. Thèse docteur ingénieur, Paris INA-PG. 320 pp. + annexes.

FIES, J. C. et CASTELAO - GEGUNDE, A. M. 1996. Modification de l'espace poral des croûtes de surface sous l'action des pluies et conséquences sur l'infiltrabilité. *Agronomie*, 16: 367 - 379.

FIES, J. C. et PANINI, T. 1995. Infiltrabilité et caractéristiques physiques de croûtes formées sur masifs d'agregats initialement secs ou humides soumis a des pluies simulé. *Agronomie*, 15: 205-220.

GOVERS, G. and POESEN, J. 1988. Assessment of the interrill and rill contributions to total soil loss from an upland field plot. *Geomorphology*, 1: 343-54.

HENIN, S et MONNIER, G. 1956. Evaluation de la stabilité de la structure du sol. In: *VI Congrès Int. Sci. Sol.* AISS Paris 1956. vol B. 49-52.

KAY, B. D. 1990. Rates of change of soil structure under different cropping systems. *Adv. Soil Sci.*, 12: 1-41.

Le BISSONNAIS, Y., BRUAND, A. and JAMAGNE, M. 1989. Laboratory experimental study of soil crusting. Relation between aggregate breakdown mechanisms and crust structure. *Catena*, 16: 377-392.

MONNIER, G., BOIFFIN, J and PAY, F. 1986. Réflexions sur l'érosion hydrique en conditions climatiques et topographiques modérées. Cas des systèmes de grande culture de l'Europe de l'Ouest. *Cah Orstom, sér. Péd.* 2: 123-131.

MULLINS, C. E., Mac LEOD, D. A., NORTHCOTE, K. H., TISDALL, J. M. and YOUNG, I. M. 1990. Hardsetting soils: behavior, occurrence and management. *Adv. Soil Sci.*, 11: 37-108.

SLATTERY, M. C. and BRYAN, R. B. 1992. Laboratory experiments on surface seal development and its effect on interrill erosion processes. *J. Soil Sci.* 43: 517-529.

TABOADA CASTRO, M^a. M. 1998. *Dinámica de la formación de costras superficiales en suelos de cultivo*. Tesis de Licenciatura. Universidad de A Coruña. 92 pp.

TABOADA CASTRO, M^a. M., PAZ GONZÁLEZ, A. y VALCÁRCEL ARMESTO, M. 1999. Condiciones de formación de la escorrentía en suelos de cultivo. En: *Avances sobre el estudio de la erosión hídrica*, editado por Paz González, A. y Taboada Castro, M.T. Colección Cursos, Congresos e Simposios, 52. Universidad de A Coruña. pp 69-99.

VALCÁRCEL ARMESTO, M. 1999. *Variabilidade espacial e temporal da erosión en solos de cultivo*. Tesis Doctoral. Escola Politécnica Superior de Lugo. Universidade de Santiago de Compostela. 266 pp.