

CONTROL DE LA EROSIÓN EN LOS TALUDES DE BANCALES, EN TERRENOS CON FUERTES PENDIENTES

V.H. DURAN ZUAZO¹, A. MARTINEZ-RAYA¹, J. AGUILAR RUIZ²

¹ Centro de Investigación y Formación Agraria de Granada. Apdo. 2027. 18080-Granada
E-mail; victorhugo@eudoramail.com

² Dpto. de Edafología y Química Agrícola, Universidad de Granada. C/Severo Ochoa s/n
Granada

Abstract. The sediment production and runoff is evaluated, during two years (1999-2000) in the talus of the terraces, in areas of intense subtropical fruit farming activity, in the South Eastern Spain region, with erosion plots, located in the own talus with a 16 m² of area, in a mean slope of 65° (214%), to an altitude of 180 m. The research is determining the effectively of vegetal covers, in the control of the erosion and runoff, of the *Thymus serpylloides* ssp. *Gadorensis* and *Salvia officinalis* L., being reduced the runoff in 40 and 30 % respectively respect to a consisting of bare soil control, without natural vegetation. The infiltration of the rainfall was increased by effect of the covers and specially the conservation and protection of the terraces. The reduction of the sediment production by effect of the *Thymus* and *Salvia* was of 63 and 54% respectively, respect to the one of bare soil. The results obtained in the present work show the important paper and the effectiveness of the vegetal covers in the soil conservation in the terraces, of the erosion its talus.

Key Words: Erosion, talus, conservation of soils, erosion plots, and vegetable covers

Resumen. Se evalúa la producción de sedimentos y escorrentía, durante dos años en los taludes de banales, en zonas de intensa actividad frutícola subtropical, localizados en el sudeste peninsular español, con parcelas cerradas de erosión, localizadas en los propios taludes con una superficie de 16 m², con una pendiente media de 65° (214%), situadas a una altitud de 180 m. La investigación ha determinado la efectividad de las cubiertas vegetales en el control de la erosión y escorrentía de: *Thymus serpylloides* ssp. *Gadorensis* y *Salvia officinalis* L., reduciéndose la escorrentía en un 40 y 30 % respectivamente con respecto a un control consistente en suelo desnudo sin vegetación natural. Así, se incrementó la infiltración del agua de lluvia y la protección de la terraza por efecto de las cubiertas vegetales. La reducción de la producción de sedimentos por efecto del tomillo y la salvia fue de un 63 y 54% respectivamente, con respecto al de suelo desnudo. Los resultados del presente trabajo demuestran la efectividad de las cubiertas vegetales en la conservación de los suelos de los taludes.

Palabras clave: Erosión, taludes, conservación de banales, parcelas cerradas, cubiertas vegetales.

INTRODUCCIÓN

El continuado y persistente deterioro del medio natural, producido por actuaciones del hombre sobre los ecosistemas áridos y semiáridos de la España mediterránea, sobre todo en las tierras del sudeste, ha ocasionado una fuerte regresión de la vegetación natural, hacia formaciones degradadas y muy abiertas, alejadas del óptimo biológico, que no protegen al suelo de la intensa erosión hídrica.

La agricultura clásica en secano tradicional, en la cual se han explotado por muchos años los suelos situados en elevadas pendientes, ha originado una degradación física continua del solum por la erosión. En la actualidad además de continuar con esta práctica, se han construido bancales o terrazas en ocasiones muy costosas, introduciendo modificaciones importantes en el perfil del suelo. La presencia de taludes sin protección vegetal ha ocasionado la destrucción de estas estructuras por la erosión. En ellas se ha establecido una agricultura intensiva de regadío de cultivos subtropicales, fundamentalmente de mango (*Mangifera indica* L.), aguacate (*Persea americana* Mill), níspero (*Eriobotryum japonica* L.), chirimoyo (*Annona cherimolia* L.) y otros.

En el estudio de los efectos y procesos debidos a la erosión hídrica, es fundamental el método de evaluación, para prever y modelizar los fenómenos de erosión. El método de la parcela cerrada para la evaluación directa en el campo, es uno de los más eficaces para cualificar y cuantificar el fenómeno de la erosión producida por el agua (Francia et al., 2000; Martínez-Raya, 1996; Albadalejo y Stocking, 1989; Albadalejo et al., 1990; Zobisch et al., 1996; Soto et al., 1995; Rubio, 1984).

Asimismo, el control biológico de la erosión por medio de cubiertas vegetales es imprescindible para la regulación de la producción de sedimentos y escorrentía

(Martínez-Raya, 1993; Andreu et al., 1998; Francis y Thornes, 1990).

El presente estudio además de tratar la protección de bancales, evalúa la aplicación de cubiertas vegetales con un posible aprovechamiento con fines medicinales, melífero y aromático, y por lo tanto el empleo de la superficie de suelo de los taludes con fines agrícolas.

MATERIAL Y MÉTODOS

La experiencia se realiza en la finca experimental "El Zahorí", en la región de Almuñécar (Granada), en ella se encuentran localizadas plantaciones de cultivos subtropicales en bancales o terrazas con longitudes entre los 100-160 m, ancho de 2-3 m y una altura (del talud) de 3-5 m. Los suelos de la zona de estudio corresponden dentro de la clasificación (Soil Survey Staff, 1999) a Xerorthent típicos o Regosoles eutrícos (FAO, 1998)(Mapa de suelos Motril, 1986). La precipitación media de la zona es de 442,0 mm. Las parcelas se encuentran localizadas en los propios taludes en una pendiente media de 65°, superficie de 16 m² (4m x 4m) y a una altitud de 180 m. Cada parcela consta de un cierre de chapa galvanizada, cajón colector y un tanque bidón que recoge las aguas de escorrentía. Las parcelas cerradas son en número de tres, dos con cubierta vegetal de plantas aromáticas de *Thymus serpylloides* ssp. *Gadorensis* y *Salvia officinalis* L. y una tercera consistente en suelo desnudo sin vegetación natural. El marco de plantación de las plantas en las parcelas fue 30 x 30 cm, aproximadamente un total de 140 plantas de tomillo y salvia por parcela. El porcentaje de cobertura vegetal fue del 70-75 % en ambos casos.

Para la medida de datos climáticos se contó con una estación meteorológica ubicada a 80 m de las parcelas. Las pérdidas de suelo se expresan en g m⁻², por evento y se refieren a suelo seco a 105° C (MAPA, 1971)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se registraron datos acerca de la producción de sedimentos y escorrentía durante dos años naturales de enero de 1999 a diciembre de 2000, alcanzando un total de 36 eventos erosivos. Se pone de manifiesto que las cubiertas vegetales, actúan como agentes amortiguadores del impacto mecánico que producen las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo, facilitando así la infiltración del agua hacia su interior, de tal forma que se modifica el balance hídrico del suelo. En las tablas 1 y 2 se presentan los volúmenes totales de escorrentía en cada año de estudio, y los porcentajes respecto al total de lluvia interceptada por parcela mensualmente.

Se puede apreciar de los resultados obtenidos, el efecto favorable producido en la conservación del suelo y disminución de la escorrentía superficial, con la ventaja de que el mismo aumentó con el transcurso del tiempo debido al desarrollo de la cubierta vegetal, influyendo de una manera notable. Sin embargo, factores como la intensidad y cantidad de la lluvia, y la pendiente entre otros, pueden afectar notablemente la infiltración (Thornes, 1995; Yair, 1996).

La escorrentía producida en la parcela con suelo desnudo sin vegetación natural

durante los dos años fue superior al de las parcelas con cubierta vegetal. La salvia y tomillo redujeron la escorrentía en un 26 y 41 % en el año 1999 y en un 34 y 38 % en el 2000, respectivamente, con respecto a la de suelo desnudo. Se aprecia que el efecto global de la cubierta vegetal en la reducción media de la escorrentía por tomillo fue del 40% y por la salvia del 30% con respecto a la parcela de suelo desnudo.

Los meses con mayor precipitación en la zona fueron de octubre (1999) con 159,3 mm y diciembre (2000) con 196,5 mm, con más intensidad en este último año, por lo que la escorrentía se duplicó con respecto a la del año anterior.

Con la reducción de la escorrentía, la tasa de infiltración media fue mayor en la parcela con cubiertas, especialmente en la de tomillo.

Asimismo, el transporte de sólidos muestra que las variaciones producidas, por efecto de una u otra cubierta vegetal, han influenciado en la disminución de la erosionabilidad del suelo. Las tablas 3 y 4 presentan la cantidad de suelo erosionado mensualmente por las lluvias. Al igual que las aguas de escorrentía, la producción de sedimentos están en función de varios factores y en nuestro caso, uno muy particular, como es la pendiente de los taludes alcanzando un valor medio de 65°.

TABLA 1: Balance del agua de lluvia erosiva interceptada por las parcelas cerradas en el año 1999

MES	Lluvia (mm)	Lluvia interc. parcela (l)	Parcela con Salvia officinalis L.				Parcela con Thymus serpylloides ssp Gadorensis				Parcela con suelo desnudo sin cubierta vegetal			
			Esc. (l)	Vol. (%)	Esc. (mm)	Infil. (mm)	Esc. (l)	Vol. (%)	Esc. (mm)	Infil. (mm)	Esc. (l)	Vol. (%)	Esc. (mm)	Infil. (mm)
I	35,1	561,6	46,0	8,2	2,88	32,2	52,4	9,3	3,28	31,8	57,8	10,3	3,61	31,5
II	16,5	264,0	14,0	5,3	0,88	15,6	13,7	5,2	0,86	15,6	17,1	6,5	1,07	15,4
III	42,6	681,6	78,9	11,8	4,93	37,7	75,7	11,1	4,73	37,9	85,4	12,5	5,34	37,3
IV	5,6	89,6	8,8	9,8	0,55	5,1	9,0	10,0	0,56	5,0	9,7	10,8	0,61	5,0
IX	42,9	686,4	70,0	10,2	4,38	38,5	45,0	6,6	2,81	40,1	93,0	13,6	5,81	37,1
X	159,3	2548,8	233,0	9,1	14,56	144,7	179,0	7,0	11,19	148,1	329,5	12,9	20,59	138,7
XI	86,4	1382,4	148,0	10,7	9,25	77,2	115,0	8,3	7,19	79,2	219,0	15,8	13,69	72,7
XII	53,7	859,2	78,0	9,1	4,88	48,8	55,0	6,4	3,44	50,3	109,0	12,7	6,81	46,9
Total	442,1	7073,6	676,7	9,6	42,29	399,8	544,8	7,7	34,05	408,1	920,5	13,0	57,53	384,6

TABLA 2. Balance del agua de lluvia erosiva interceptada por las parcelas cerradas en el año 2000.

MES	Lluvia (mm)	Lluvia interc. parcela (l)	Parcela con Salvia officinalis L.				Parcela con Thymus serpylloides ssp Gadorensis				Parcela con suelo desnudo sin cubierta vegetal			
			Esc. (l)	Vol. (%)	Esc. (mm)	Infil. (mm)	Esc. (l)	Vol. (%)	Esc. (mm)	Infil. (mm)	Esc. (l)	Vol. (%)	Esc. (mm)	Infil. (mm)
I	32,1	513,6	45,0	8,8	2,81	29,3	50,0	9,7	3,13	29,0	81,0	15,8	5,06	27,0
III	23,0	368,0	18,0	4,9	1,13	21,9	13,0	3,5	0,81	22,2	21,0	5,7	1,31	21,7
IV	84,4	1350,4	321,0	23,8	20,06	64,3	317,0	23,5	19,81	64,6	476,0	35,2	29,75	54,7
V	65,4	1046,4	208,0	19,9	13,00	52,4	180,0	17,2	11,25	54,2	261,0	24,9	16,31	49,1
X	77,5	1240,0	128,8	10,4	8,05	69,5	122,5	9,9	7,66	69,8	202,6	16,3	12,66	64,8
XII	196,5	3144,0	409,2	13,0	25,58	170,9	376,3	12,0	23,52	173,0	664,6	21,1	41,54	155,0
Total	478,9	7662,4	1130,0	14,7	70,63	408,3	1058	13,8	66,18	412,7	1706,2	22,3	106,6	372,3

TABLA 3. Producción de sedimentos provocados por las lluvias erosivas en el año 1999.

MES	Lluvia (mm)	Lluvia interc. parcela (l)	Parcela con Salvia officinalis L.		Parcela con Thymus serpylloides ssp Gadorensis		Parcela con suelo desnudo sin cubierta vegetal	
			Sec. parcela (g)	Sed. (g m ⁻²)	Sec. parcela (g)	Sed. (g m ⁻²)	Sec. parcela (g)	Sed. (g m ⁻²)
I	35,1	561,6	198,1	12,4	229,2	14,3	300,6	18,8
II	16,5	264,0	101,9	6,4	105,7	6,6	129,2	8,1
III	42,6	681,6	575,5	36,0	476,8	29,8	730,9	45,7
IV	5,6	89,6	12,1	0,8	14,1	0,9	20,6	1,3
IX	42,9	686,4	567,6	35,5	324,9	20,3	914,2	57,1
X	159,3	2548,8	2387,6	149,2	1400,7	87,5	4527,7	283,0
XI	86,4	1382,4	1134,1	70,9	1390,6	86,9	4246,6	265,4
XII	53,7	859,2	550,0	34,4	369,0	23,1	1375,6	86,0
Total	442,1	7073,6	5526,9	345,4	4311,0	269,4	12245,4	765,3

TABLA 4. Producción de sedimentos provocados por las lluvias erosivas en el año 2000.

MES	Lluvia (mm)	Lluvia interc. parcela (l)	Parcela con Salvia officinalis L.		Parcela con Thymus serpylloides ssp Gadorensis		Parcela con suelo desnudo sin cubierta vegetal	
			Sec. parcela (g)	Sed. (g m ⁻²)	Sec. parcela (g)	Sed. (g m ⁻²)	Sec. parcela (g)	Sed. (g m ⁻²)
I	32,1	513,6	484,2	30,3	536,5	33,5	1266,0	79,1
III	23,0	368,0	7,3	0,5	16,4	1,0	29,4	1,8
IV	84,4	1350,4	850,8	53,2	553,1	34,6	2296,6	143,5
V	65,4	1046,4	645,5	40,3	491,2	30,7	941,2	58,8
X	77,5	1240,0	222,1	13,9	351,7	22,0	1580,1	98,8
XII	196,5	3144,0	5363,9	335,2	4453,2	278,3	10376,8	648,5
Total	478,9	7662,4	7573,8	473,4	6402,1	400,1	16490,1	1030,5

Así, los sedimentos generados en las parcelas por cada evento erosivo fueron mayores

en la de suelo desnudo sin vegetación natural. En las parcelas de tomillo y salvia se redujo

el transporte de sedimentos durante el año 1999 en 65 y 55%, y para el año 2000 en 61 y 54%, respectivamente, con relación al control de suelo desnudo.

Similar a la escorrentía, en los meses que más se generaron sedimentos fué en los que mayor precipitación hubo (Diciembre 2000), siendo algo más que el doble, debido a que fue durante este ultimo cuando se produjeron lluvias diarias con el inicio del invierno.

En la tabla 5 se presentan los resultados del análisis de la varianza para evaluar el efecto de las cubiertas vegetales en la producción de sedimentos, escorrentía e infiltración. Se determina que los valores medios de escorrentía y sedimentos de las parcelas de tomillo y salvia son significativamente diferentes con respecto al de suelo desnudo, y no así entre las dos cubiertas. Sin embargo, el valor de las medias de la escorrentía y sedimentos del tomillo fueron inferiores a la de salvia. La infiltración media de la parcela de suelo desnudo es estadísticamente diferente a las de cubierta vegetal, siendo mayor en la de tomillo.

Relacionamos el efecto de las cubiertas en cada caso con las lluvias erosivas producidas durante el periodo de estudio, con el fin de obtener un modelo mediante el cual poda-

TABLA 5. Comparación múltiple para pares de media de escorrentía, sedimentos e infiltración.

Cubierta vegetal	Escorrentía (mm)	Sedimentos (g m ⁻²)	Cubierta vegetal	Infiltración (mm)
Tomillo (To)	2,34a	16,12a	Suelo des. (Sd)	18,25a
Salvia (Sa)	2,64a	19,66a	Salvia (Sa)	19,47b
Suelo des. (Sd)	3,86b	42,94b	Tomillo (To)	19,77b

Medias con diferentes letras minúsculas son significativamente diferentes al 95% LSD

mos expresar matemáticamente el proceso. El análisis de regresión potencial (multiplicativo) es el que mejor se adapta a los resultados obtenidos (Tabla 6). Del correspondiente análisis se concluye la existencia de relaciones significativas entre las variables salvia (Sa),

tomillo (To) y suelo desnudo sin vegetación natural (Sd) (escorr., sed. e infil.) y las lluvias (pp) con un nivel de confianza del 99%.

El efecto de las cubiertas vegetales con respecto al de sin vegetación natural, en la protección de los taludes en fuertes pendientes, se hace patente en los resultados obtenidos, demostrándose la efectividad de la cubierta consistente en tomillo con respecto al de salvia, pero que en definitiva ambas cubiertas fueron eficaces, disminuyendo la escorrentía el transporte de sedimentos e incrementando las tasas de infiltración (Tabla 7).

Andreu et al. (1998) en parcelas cerradas, con 425 mm año⁻¹ de lluvia y con una pendiente del 20%, describe que el transporte medio de sedimentos se redujo con *Medicago arborea* L., *Psaoralea bituminosa* L. y vegetación natural, en 37,6; 11,32 y 74,96%, respectivamente, comparado con el de suelo desnudo. En nuestro caso la media para la *Salvia officinalis* L. y *Thymus serpylloides* ssp. *Gadorensis* fue de 54 y 63%, con una pendiente media del talud del 214 %.

En el caso de la escorrentía la reducción media, para *Medicago arborea* L., *Psaoralea bituminosa* L. y vegetación natural fue de 32,04; 20,98 y 52,80%, respectivamente, con relación al control de suelo desnudo. En nuestra experiencia, la reducción media para el talud fue de 30 y 40% para la *Salvia officinalis* L. y *Thymus serpylloides* ssp. *Gadorensis*., respectivamente. Por lo tanto, el tomillo con respecto a la salvia reduce la escorrentía en un 10 % más y el transporte de sedimentos en un 9 %.

La infiltración media, sin contar que existen otros factores que intervienen en el balance como es la evapotranspiración, fue del orden de 7 y 8% más que la de sin vegetación natural, para la salvia y el tomillo, siendo el incremento en la tasa de infiltración debido a la cubierta de tomillo un 1 % más que la de salvia.

TABLA 6. Análisis de regresión potencial (multiplicativo) de las cubiertas Vegetales con las lluvias erosivas durante el periodo 1999-2000.

Aguas de escorrentía				
Cubierta vegetal	Coefficiente de correlación	R²	Error estándar	Ecuación del modelo y = a · x^b (mm) (pp: lluvia)
Salvia officinalis L.	0,859	78,83	0,574	Sa (escorr.) = 0,0496·pp ^{1,258}
Thymus serpylloides	0,815	66,52	0,622	To (escorr.) = 0,0623·pp ^{1,144}
Suelo desnudo sin vegetación nat.	0,865	74,90	0,570	Sd (escorr.) = 0,0662·pp ^{1,284}
Sedimentos sólidos				
Cubierta vegetal	Coefficiente de correlación	R²	Error estándar	Ecuación del modelo y = a · x^b (mm) (pp: lluvia)
Salvia officinalis L.	0,725	52,67	1,304	Sa (sed.) = 0,0377·pp ^{1,794}
Thymus serpylloides	0,711	50,69	1,195	To (sed.) = 0,0686·pp ^{1,581}
Suelo desnudo sin vegetación nat.	0,762	58,20	1,127	Sd (sed.) = 0,1227·pp ^{1,727}
Infiltración				
Cubierta vegetal	Coefficiente de correlación	R²	Error estándar	Ecuación del modelo y = a · x^b (mm) (pp: lluvia)
Salvia officinalis L.	0,992	98,58	0,089	Sa (infil.) = 0,9321·pp ^{0,977}
Thymus serpylloides	0,993	98,77	0,084	To (infil.) = 0,9190·pp ^{0,986}
Suelo desnudo sin vegetación nat.	0,982	96,54	0,139	Sd (infil.) = 0,9103·pp ^{0,961}

TABLA 7. Efecto global de las cubiertas vegetales durante el año natural

Cubierta vegetal	Escorrentía (mm año⁻¹)	Sedimentos (g m⁻² año⁻¹)	Infiltración (mm año⁻¹)
Thymus serpylloides	50,1	334,8	410,1
Salvia officinalis L.	56,1	409,4	404,1
Suelo desnudo sin veg. nat.	82,1	898,0	378,4

La producción media mensual de escorrentía durante los dos años, con una precipitación media anual de 460,5 mm, se caracterizó por mantener una estrecha relación proporcional con la cantidad de lluvia caída. Asimismo, se mantuvo la tendencia a la menor producción en la parcela de *Thymus serpylloides ssp Gadorensis* con respecto a los dos restantes (Fig. 1). En cuanto a la producción media mensual de sedimentos la tendencia fue prácticamente similar (Fig. 2).

Los meses con mayor producción de escorrentía fueron diciembre, octubre, abril, mayo, noviembre y enero. Asimismo, los meses de mayor riesgo de erosión, por la producción de sedimentos fueron diciembre,

octubre, noviembre, enero y abril. La intensidad de la lluvia y el tiempo en el cual se produjeron las precipitaciones condiciona la presencia de la escorrentía y sedimentos.

Así, un medio efectivo en la prevención y protección de los taludes y por lo tanto de los bancales, consiste en la utilización de cubiertas vegetales, que disminuyen la escorrentía y el arrastre de sólidos. En nuestra experiencia la cubierta de *Thymus serpylloides ssp. Gadorensis* fue más efectiva que la de *Salvia officinalis* L.

Es importante destacar la estructura de la planta en el campo, la *Salvia officinalis* L. se presenta con tallos o vástagos de 30 a 40 cm por encima de la superficie del suelo, con hojas opuestas, el *Thymus serpylloides ssp. Gadorensis*, es una planta rastrera que apenas se eleva de la superficie del suelo, con abundantes y diminutas hojas, formando un tapiz vegetal a modo de red, que frena a las aguas de escorrentía producidas por las lluvias, y por lo tanto, evita el movimiento de partículas sólidas.

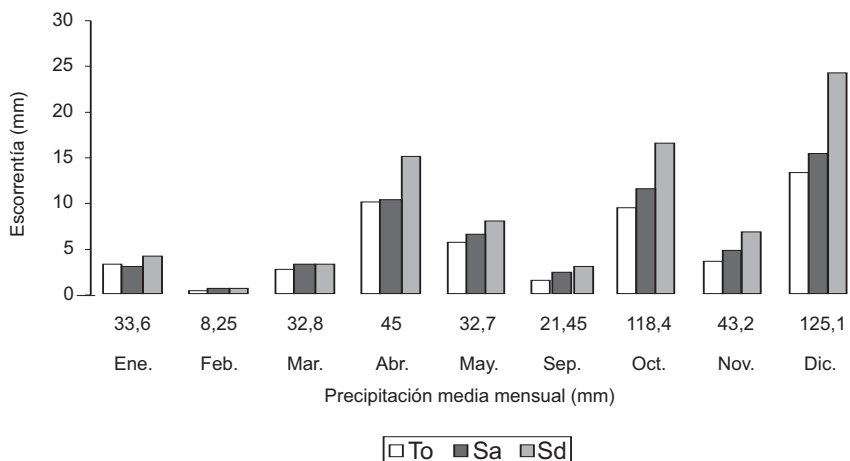


FIGURA 1. Producción mensual de escorrentía. To=*Thymus serpylloides* ssp. *Gadorensis*, Sa=*Salvia officinalis* L., Sd=Suelo desnudo sin vegetación natural.

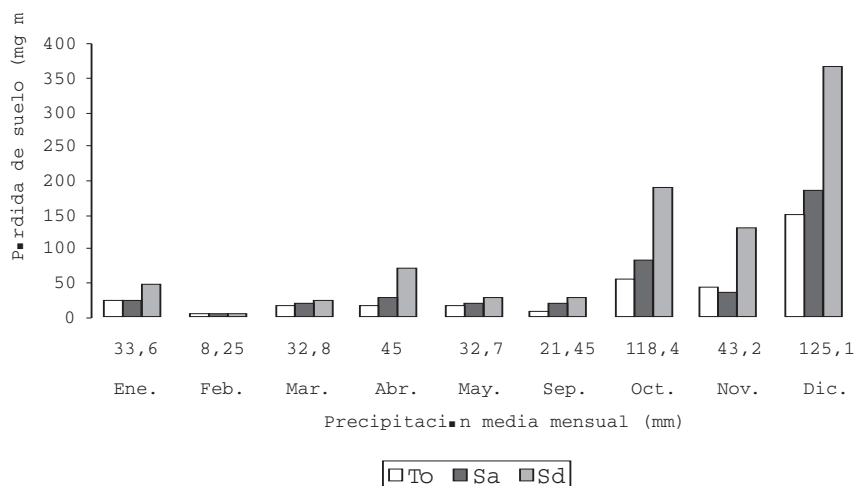


FIGURA 2. Producción mensual de sedimentos. To=*Thymus serpylloides* ssp. *Gadorensis*, Sa=*Salvia officinalis* L., Sd=Suelo desnudo sin vegetación natural

CONCLUSIONES

Las cubiertas vegetales son imprescindibles para el control de la erosión y escorrentía en fuertes pendientes (214%), la cubierta de *Thymus serpylloides ssp. Gadorensis* y *Salvia officinalis* L. reducen la producción de la escorrentía en los suelos de los taludes en los bancales en un 40 y 30 % respectivamente, con respecto a un control con suelo desnudo sin vegetación natural. Asimismo, disminuyen la producción de sedimentos por efecto debido a las mismas en un 63 y 54 %, respectivamente.

La protección del bancal o terraza, es posible realizarlo de una forma efectiva, empleando para ello plantas con posible aprovechamiento aromático, medicinal o melífero, lo que en definitiva, representa un medio coherente en el restablecimiento del equilibrio ambiental natural y la protección del medio ambiente.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento por la ayuda prestada a Francisco Peña Director de la finca experimental "El Zahorí" y al personal del Patronato de Cultivos Subtropicales del Ayuntamiento de Almuñécar. Asimismo, al Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (I.N.I.A.) del Ministerio de Ciencia y Tecnología, gracias al proyecto SC-97016, ha sido posible este trabajo.

REFERENCIAS

- Andreu, V., Rubio, J.L., and Cerni, R. (1998): Effects of Mediterranean shrub cover on water erosion (Valencia-Spain). *J. Soil and Wat. Cons.* 53(2), 112-120.
- Albadalejo, M.S. and Stocking, M.A. (1989): Comparative evaluation of two models in predicting storm soil loss from erosion plots in semi-arid Spain. *Catena* 16, 227-236.
- Albadalejo, J., Stocking, M.A. y Díaz, E. (1990): Degradación y Regeneración del suelo en condiciones ambientales mediterráneas. C.S.I.C. 235 p.
- FAO (1998): "World reference base for soil resources". World Soil Resources Reports, 84. FAO, ISRIC and ISSS. Roma. 88 p.
- Francia M.J.R., Martínez-Raya, A. y Ruiz Gutiérrez, S. (2000): Erosión en suelo de olivar en fuertes pendientes. Comportamiento de distintos manejos de suelo. S.E.C.S. *Edafología* (7-2), 147-155.
- Francis, C.F. and Thornes, J.B. (1990): Runoff hydrographs from three Mediterranean vegetation cover types. In J.B. Thornes (Editor). *Vegetation and Erosion. Processes and environments*. Wiley. Chichester. 363-384.
- Martínez-Raya, A., Cuadros, S. y Francia, J.R. (1993): Plantas aromáticas, melíferas y medicinales: caracterización y selección enfocada a la lucha contra la erosión. Sociedad Española de Ciencias Forestales. T. III.
- Martínez-Raya, A., Francia, J.R., Cuadros, S. y Aguilar, J. (1996): Field evaluation of runoff and erosion controls by scrub with feasible economic exploitation. European Congress on Erosion Control.
- Mapa de suelos Motril-1055.(1986): Proyecto Lucdeme. M.A.P.A. I.C.O.N.A. Escala 1:100.000. Universidad de Granada Facultad de Ciencias Dpto. de Edafología, 118 p.
- M.A.P.A.(1971): *Métodos Oficiales de Análisis*. Dirección General de Agricultura, Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, Madrid, 402 p.
- Rubio, J.L., Sánchez, J., Sanroque, P. y Molina, M.J. (1984): Metodología de evaluación de la erosión hídrica en suelos del área mediterránea. I Congreso

- Nacional de la Ciencia del Suelo. Vol. II, 827-836.
- Soto, B., Basanta, R., Pérez, R. and Diaz-Fierros, F. (1995): An experimental study of the influence of traditional slash-and-burn practices on soil erosion. *Catena* 24, 13-23.
- Soil Survey Staff (1999): "Soil Taxonomy". A Basic System of Soil Classification for Making & Interpreting Soil Surveys. USDA. Agric. Handbook, 2^a ed. N° 436. 778 p.
- Thornes, J.B. (1995): Mediterranean desertification and vegetation cover. In R. Fantechi D.; Balabanis and Rubio, J.L. (eds.). Desertification in an European context: Physical and socio-economic aspects. European Commission. Brussels. 169-195
- Yair, A. (1996): Spatial variability in runoff in semi-arid and arid areas. In J.L. Rubio and A. Calvo (eds.). Soil degradation and desertification in Mediterranean environments. *Geoderma ed.*, 71-90.
- Zöbisch, M.A., Klingspor, P. and Oduor, A.R. (1996): The accuracy of manual runoff and sediment sampling from erosion plots. *J. Soil and Water Cons.* 51(3), 231-233.

CLASIFICACIÓN DE SUELOS EN PASTOS ALPINOS DE AÍSA Y ORDESA (PIRINEO CENTRAL)

D. BADÍA VILLAS¹, R. GARCÍA-GONZALEZ², C. MARTÍ DALMAU¹

¹Escuela Politécnica Superior de Huesca, Crtra. Cuarte s/n. 22071-HUESCA

²Instituto Pirenaico de Ecología-CSIC, Avda. Rgto. Galicia, 19. 22700-JACA

Abstract. The soils of five grassland communities in Aísa and Ordesa uplands (Central Pyrenees) are classified by the World Reference Base of Soil Resources system (WRB) and Soil Taxonomy System (STS): *Bromion erecti*, *Nardion strictae*, *Festucion eskiae* and *Primulion intricatae* (developed on calcilutites) and *Festucion gautieri* (developed on hard limestones). The soils of the *Nardion strictae* and *Festucion eskia* communities are strongly acidic, desaturated and with a high organic matter content; they are classified as Humic Umbrisols by WRB (Humic Dystrocryepts by STS). The soils of the *Bromion erecti* and *Primulion intricatae*, with higher pH and base saturation than the previous ones, are classified as Phaeozems (haplic, pachic or calcaric) by WRB system (Humic Eutrocryepts or Humic Dystrocryepts by STS). The soil of the *Festucion gautieri* community has a neutral or basic pH, a complete base saturation and low water retention capacity; as well as scarce and irregular depth which modify its classification between Humic Leptosols and Lepto-humic Regosols by WRB (Lithic Cryorthent by STS).

Key words: soil classification, high mountains, grassland-soil relationships

Resumen. Se caracterizan los suelos de cinco comunidades de pastos supraforestales en los puertos de Aísa y Ordesa (Pirineo Central): *Bromion erecti*, *Nardion strictae*, *Festucion eskiae* y *Primulion intricatae* (desarrollados sobre calcilutitas) y *Festucion gautieri* (sobre calizas), clasificándose según los sistemas FAO (WRB) y *Soil Taxonomy* (STS). Los suelos del *Nardion strictae* y *Festucion eskiae*, suelos fuertemente ácidos, desaturados en bases y con un alto porcentaje de materia orgánica, se clasifican, según FAO, como Umbrisoles húmicos (Dystrocryepts húmicos por STS). Los suelos del *Bromion erecti* y *Primulion intricatae*, con mayor pH y saturación de bases son clasificados como Phaeozems (háplicos, páchicos o calcáricos) por FAO (Eutrocryepts o Dystrocryepts húmicos por STS). Los suelos del *Festucion gautieri*, poseen una reacción neutra o básica, completa saturación de bases y baja capacidad de retención de agua; la escasa e irregular profundidad hace variar su clasificación FAO entre Leptosoles húmicos y Regosoles lepto-húmicos (Cryorthent líticos por STS).

Palabras clave: clasificación de suelos, alta montaña, relaciones suelo-pasto

INTRODUCCIÓN

Las zonas de montaña pirenaica están dedicadas, en más de la mitad de su superficie, a los pastos (M^o Agricultura, 1974; Montserrat y Fillat, 1990; Piekowski *et al.*,

1996). Dentro de los pastos se pueden distinguir más de cien comunidades vegetales o asociaciones fitosociológicas (Braun-Blanquet, 1948; Rivas Martínez, 1991), entre cuyos factores de distribución destaca el suelo. En el Pirineo Central, diversos autores

han elaborado estudios sobre la relación suelo-pasto, desde el valle de Benasque, Ribagorza (Broca, 1993) al valle de Tena, Serrablo (Ferrer, 1981) e incluso cartografías de suelos en zonas próximas (Iñiguez *et al.*, 1990, Badía y Martí, 1999). Este trabajo pretende complementar los anteriores, centrándose en la caracterización de perfiles edáficos en los puertos de Aísa (Jacetania) y Ordesa (Sobrarbe). Para ello se han descrito y clasificado los perfiles edáficos más característicos de cada pasto y en cada localidad.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se caracterizan, en dos localidades diferentes (Aísa y Ordesa), los suelos de cinco comunidades pascícolas, correspondientes a las alianzas fitosociológicas siguientes: *Nardion strictae* (Na), *Bromion erecti* (Be), *Festucion eskiae* (Fe), *Festucion gautieri* (Fg) y *Primulion intricatae* (Pr). Para ello, se describe, analiza y clasifica un perfil tipo para cada una de las alianzas y localidad. La clasificación de los suelos se ha establecido siguiendo la Base de Referencia Mundial de Suelos (FAO, 1999) y *Soil Taxonomy* (SSS, 1999). En trabajos previos, se ha caracterizado el volumen explorado por los sistemas radiculares de estos mismos pastos (Badía *et al.*, 2002).

Entre las características morfológicas, se han descrito el color (seco y húmedo), la forma de la estructura, la compacidad, así como la forma y nitidez del límite de cada horizonte. Se realizan las siguientes determinaciones químicas y físicas: pH (H₂O), materia orgánica, nitrógeno total, C/N, iones intercambiados, capacidad de intercambio catiónico, saturación de bases, porosidad, granulometría, elementos gruesos, agua a capacidad de campo y a punto de marchitez permanente. Por diferencia entre estos dos últimos parámetros se obtiene la capacidad de retención de agua disponible (CRAD). Se ofrece en mm (l/m²) para una profundidad máxima

de suelo de 1,5 m, si se alcanza (USDA, 1980), calculada mediante la siguiente expresión:

$$\text{CRAD} = (\text{CC} - \text{PMP}) \text{ litros}/100 \text{ kg tierra fina} \times (100 - \% \text{EG}) \text{ kg tierra fina}/100 \text{ kg suelo} \times \text{Da, kg}/\text{m}^3 \times \text{p, m}$$

siendo:

CC=Capacidad de campo, agua retenida a 33 kPa (en litros por 100 kg tierra fina o %p/p)

PMP=Punto de Marchitez Permanente, agua retenida 1500 kPa (en litros por 100 kg tierra fina o % p/p)

EG: Elementos gruesos (en kg por 100 kg de suelo, o % p/p).

Da=Densidad aparente (en kg/m³)

p=Espesor del horizonte (en metros)

Más detalles sobre la metodología utilizada en las determinaciones físico-químicas se ofrecen previamente (Badía y Martí, 2002).

Con los datos obtenidos se realizan correlaciones de Pearson entre parámetros, así como una clasificación jerárquica con el método de conglomeración por vinculación entre grupos usando el paquete estadístico SPSS (1999).

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Los suelos estudiados se localizan en los pastos supraforestales de los puertos de Aísa (Jacetania) y de Ordesa (Sobrarbe), entre una altitud de 1.780 y 2.350 metros (Tabla 1). En concreto, *Bromion erecti*, *Festucion eskiae* y *Festucion gautieri* se sitúan en la parte superior del piso subalpino mientras *Nardion strictae* y *Primulion intricatae* se sitúan en el piso alpino (Remón y Gómez, 1989; Remón, 1997). Con la altitud, la precipitación anual media varía entre 1200 y 2000 mm y la temperatura anual media entre 7°C y 3°C, condiciones que hacen fluctuar el periodo vegetativo de 150 a 80 días (García-González *et al.*, 1991; Aldezabal, 2001). En Ordesa, a 2.200 m de altitud (Refugio de Góriz), la tempera-

tura media anual atmosférica es de 4,9°C, con una media estival de 11,7°C e invernal de -0,1°C. Por otro lado, en el valle de Aísa, a 1.780 metros de altitud, la temperatura media anual es de 5,5°C, con una media estival de 13,5°C e invernal de -0,6°C. Con estas condiciones, la temperatura estival del suelo será ligeramente inferior a la atmosférica, si bien la media edáfica anual, por el aislamiento térmico que supone la cobertura nival en invierno, será entre 1 y 2°C superior a la del aire. Así pues, el régimen de temperatura del suelo puede considerarse crítico, con una temperatura anual media a 50 cm de profundidad del

suelo inferior a los 8°C y con una media de los meses de verano inferior a los 15°C.

Con los datos de humedad disponibles, el régimen de humedad del suelo se considera údico (no existen más de 90 días acumulados al año en los que el suelo esté seco) para todas las comunidades vegetales y localidades; los suelos del *Festucion gautieri*, a pesar de la alta pluviometría media anual, podrían tener un régimen más próximo al xérico, dada su escasa capacidad de almacenamiento de agua y su disposición en laderas con fuerte pendiente y elevada insolación.

TABLA 1. Factores de formación de los suelos estudiados en Aísa y Ordesa (Pirineo Central).

Referencia suelos	Alianza vegetal y producción neta	Litología	Altitud (metros)	(°)	Geoforma y orientación	Ubicación: UTM (31 T) y Topónimo
Na-Aísa	Nardion strictae 180 g/m ² y año	Coluvio de lutitas y areniscas sobre calizas. Eoceno	1830	0	Rellano	6972 47372 Ibon de Izagra
Na-Ordesa	Nardion strictae 370 g/m ² y año	Lutitas. Eoceno	1930	14	Ladera-N	2564 47217 Cuello Arenas-Ripalés
Be-Aísa	Bromion erecti 360 g/m ² y año	Coluvio de lutitas y areniscas. Eoceno	1780	9	Ladera-S	6990 47302 Sayerri
Be-Ordesa	Bromion erecti 370 g/m ² y año	Lutitas. Eoceno	1930	5	Ladera-N	2562 47217 Cuello Arenas-Ripalés
Fe-Aísa	Festucion eskiae 1020 g/m ² y año	Lutitas y areniscas. Eoceno	2050	5	Cresta	6992 47354 Collado la Magdalena
Fe-Ordesa	Festucion eskiae 560 g/m ² y año	Lutitas y areniscas. Eoceno	2170	42	Ladera-S	2491 47253 Punta Acuta
Fg-Aísa	Festucion gautieri 150 g/m ² y año	Calizas. Paleoceno	2220	14	Cresta	6991 47344 Pico Blancas
Fg-Ordesa	Festucion gautieri 115 g/m ² y año	Calizas. Paleoceno	2170	42	Ladera-S	2491 47253 Punta Acuta
Pr-Aísa	Primulion intricatae 205 g/m ² y año	Coluvio de calizas. Paleoceno	2260	14	Ladera-N	6963 47385 Ruabe de Bernera
Pr-Ordesa	Primulion intricatae 193 g/m ² y año	Calizas laminadas y lutitas. Eoceno	2350	14	Ladera-S	2554 47283 Faja Luenga (Refugio de Góriz)

El material parental de los suelos de la mayor parte de las alianzas estudiadas está constituido por calcilitas, con cierta proporción de areniscas fundamentalmente de cemento calcáreo, del Eoceno, materiales ocasionalmente coluvionados; la excepción la constituye el *Festucion gautieri* desarrolla-

do sobre calizas paleocénicas dispuestas in situ (IGME, 1982).

La caracterización florística de los pastos ha sido previamente descrita (Aldezabal, 2001; García-González *et al.*, 1991; García-González *et al.*, 1997; Gómez *et al.*, 1997; Remón y Gómez, 1989; Remón, 1997; Villar y Benito, 1994).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características morfológicas y físico-químicas

Entre las principales características morfológicas (Tabla 2), destaca el oscuro color de los horizontes superficiales. En estos, el color marrón grisáceo (2,5Y 5/2, en seco) es el más frecuente tendiendo a pardo pálido en los suelos del *Festucion gautieri*; esta característica tiene su importancia en la definición de los epipedones móllicos o úmbricos. En profundidad, los colores se vuelven ligeramente

más claros a causa del menor contenido orgánico y más amarillentos o verde oliváceos, cuando son las calcilitas el material originario. En ningún caso se desarrolla un matiz más rojo en los horizontes Bw que en los C. Los materiales parentales lutíticos son de por sí muy oscuros (brillo de 6 en seco y de 4 o 5 en húmedo) por lo que la exigencia de color para móllico resulta más fácil de verificar en los suelos desarrollados sobre las lutitas que sobre las calizas, como sucede con otros materiales originariamente oscuros como los materiales volcánicos (Delgado *et al.*, 2001).

TABLA 2. Propiedades morfológicas de los perfiles edáficos de Aísa y Ordesa (Pirineo Central).

Ref. Perfil y Horizontes	Profundidad (cm)	Color Munsell seco y húmedo	Estructura	Compacidad	Límite inferior
Na-Aísa					
A	0-20	2,5Y 5/2 3/2	Granular fina	Poco compacto	Neto
Bw	20-38	2,5Y 6/2 4/4	Granular gruesa	Poco compacto	Contacto lítico
Na-Ordesa					
Ah	0-25	2,5Y 5/2 3/2	Bloques granulares	Poco compacto	Neto
Bw/C	25-70	2,5Y 6/3 5/4	Bloques subangulares	Poco compacto	Neto
C	70-100	2,5Y 6/3 5/4	Heredada	Compacto	
Be-Aísa					
A	0-30	10YR 5/3 3/3	Granular grueso	Poco compacto	Gradual
Bw	30-70	10YR 6/2 3/3	Bloques subangulares	Poco compacto	Gradual
C	70-150	10YR 6/3 5/4	Heredada	Compacto	
Be-Ordesa					
Ah	0-20	2,5Y 5/2 3/3	Bloques granulares	Poco compacto	Gradual
Bw	20-50	2,5Y 6/2 4/3	Bloques subangulares	Poco compacto	Abrupto
C	50-100	2,5Y 6/2 4/3	Bloques angulares	Compacto	
Fe-Aísa					
A	0-35	2,5Y 5/3 3/2	Granular gruesa	Poco compacto	Abrupto
Bw	35-70	2,5Y 6/3 5/4	Bloques subangulares	Poco compacto	Abrupto
C	70-120	2,5Y 6/3 4/4	Heredada	Compacto	
Fe-Ordesa					
Ah	0-20	2,5Y 5/2 3/3	Bloques granulares	Poco compacto	Gradual
B	20-50	2,5Y 6/3 4/4	Bloques subangulares	Poco compacto	Neto
C	50-100	2,5Y 6/2 4/3	Heredada	Compacto	
Fg-Aísa					
A	0-17	10YR 6/3 4/3	Granular muy fina	Poco compacto	Contacto lítico
Fg-Ordesa					
A	0-30	10YR 6/3 4/2	Granular	Poco compacto	Neto
Bw/R	<40	10YR 6/2 4/4	Bloques subangulares		Contacto lítico
Pr-Aísa					
A	0-65	2,5Y 5/2 3/3	Granular	Poco compacto	Gradual
Bw	65-120	2,5Y 6/3 4/4	Bloques subangulares	Poco compacto	
Pr-Ordesa					
A	0-30	10YR 5/2 3/2	Bloques angulares	Poco compacto	Neto
2Bw	30-60	10YR 5/2 3/2	Bloques angulares	Poco compacto	Gradual
2C	60-90	10YR 6/2 4/2	Heredada	Compacto	

Abreviaturas: *Nardion strictae* (Na), *Bromion erecti* (Be), *Festucion eskiae* (Fe), *Festucion gautieri* (Fg) y *Primulion intricatae* (Pr).

La estructura de los horizontes superficiales se presenta en forma granular y en profundidad pasa a bloques angulares o subangulares hasta llegar a los diferentes materiales parentales, fundamentalmente lutitas con una morfología heredada, en capas, todavía patente. En general, el desarrollo estructural de estos suelos es fuerte, incluso en la alianza *Festucion gautieri*, donde a pesar de la gran abundancia de elementos gruesos, la

matriz mantiene agregados estables. En relación con la estructura, la compacidad es escasa.

Los límites inferiores en los horizontes son generalmente planos y netos, relacionados con los sistemas radiculares de los pastos, en el caso de los horizontes superficiales y con el material parental en el caso de los subsuperficiales.

TABLA 3. Propiedades fisico-químicas de los perfiles edáficos de Aísa y Ordesa (Pirineo Central).

Ref. Perfil Horizontes	EG (%)	Poros (%)	CC (%)	PMP (%)	pH (H ₂ O)	CO ₃ (%)	V (%)	MO (%)	C/N	CIC cmol/kg	C.textural (USDA)
Na- Aísa											
A	10	65	51,3	22,9	5,4	0	37,6	8,3	7,8	19,8	F-arcilloso
Bw	15		28,3	12,9	5,7	0	32,7	2,7		11,1	F-arcilloso
Na-Ordesa											
Ah	5	66	63,8	12,2	4,4	0	21,4	18,1	9,7	29,5	F-arcilloso
Bw/C	25		38,8	20,2	5,1	0	8,2	4,85		15,6	Arcillo-lim
C	83		64,7	13,1	6,3	0	9,3	2,89		10,5	F-arci-limo
Be- Aísa											
A	20	51	39,4	14,6	6,2	0	58,9	5,42	7,8	15,6	F-arcilloso
Bw	20		26,7	8,6	5,8	0	34	2,07		8,6	Franco
C	45		26,6	9,8	5,8	0	26,1	0,72		9,2	Arcilloso
Be-Ordesa											
Ah	4	73	56,2	44,1	7,1	0	96,4	11,88	9,6	22,7	F-arcilloso
Bw	24		44,1	23,5	7,3	0	98,1	5,8		15,2	Arcilloso
C	61		46,21	12,4	7,9	1,3	100	2,6		11,9	Franco
Fe- Aísa											
A	10	54	40,9	20,5	5,2	0	25,3	6,31	10,9	15,5	F-arcilloso
Bw	30		39,5	10,5	5,4	0	10	4,72		9,7	Franco
C	50		42,1	11,6	5,7	0	22,2	1,26		10,1	Franco
Fe-Ordesa											
Ah	6	62	44,1	24,8	5,1	0	37,6	11,67	10,3	16,9	F-arcilloso
Bw	11		40,8	16,7	5,4	0	31,5	4,46		14,7	F-arcilloso
C	54		42,1	11,6	5,5	0					F-arcilloso
Fg-Aísa											
A	80	45	32,1	14,3	7,5	3,1	100	4,64	7	17,8	Franco
Fg-Ordesa											
A	51	43	35,8	15,3	7,1	0	100	4,63	6,6	14	Franco
Bw/R	92		26,3	13,6	7,8	1	100	1,16		11,7	F-arcilloso
Pr-Aísa											
A	2	64	52,6	24	5,7	0	73,8	13,85	12,7	29,4	Arc-limoso
Pr-Ordesa											
A	7	60	32,8	12,8	7	0	97,1	5,44	10,6	11,4	F-arcilloso
2Bw	86		25,1	8,1	7,9	3	100	2,1		8,5	Franco
2C	92		21,4	6,4	8,1	3,4	100	1,6		6,8	F-arcilloso

Abreviaturas: *Nardion strictae* (Na), *Bromion erecti* (Be), *Festucion eskiae* (Fe), *Festucion gautieri* (Fg) y *Primulion intricatae* (Pr).

En referencia a las propiedades físicas, destaca la elevada porosidad en los horizontes superficiales, carácter habitual en suelos de prados permanentes o pastos, ricos en

materia orgánica (Saña *et al.*, 1996). En este sentido, la porosidad se correlaciona significativa y positivamente con la materia orgánica ($r=0,68$; $p<0,05$) y la arcilla ($r=0,65$;

$p < 0,05$) y negativamente con la pedregosidad ($r = -0,79$; $p < 0,01$) para los horizontes superficiales ($n = 10$). Con estos precedentes, se ha puesto de manifiesto como los suelos del *Festucion gautieri* presentan los valores de porosidad más bajos que en el resto de comu-

nidades. La pedregosidad en esta comunidad es significativamente mayor al resto, lo que, con su escasa e irregular profundidad, condiciona la capacidad de retención de agua disponible o CRAD (Tabla 4).

TABLA 4. Capacidad de retención de agua disponible (CRAD, en mm/1,5 m o hasta un contacto lítico) de los perfiles edáficos de Aísa (A) y Ordesa (O) en las diferentes comunidades de pastos: Fg, *Festucion gautieri*; Na, *Nardion strictae*; Be, *Bromion erecti*; Pr; *Primulion intricatae*; Fe, *Festucion eskiae*.

Perfil	Fg-A	Fg-O	Na-A	Na-O	Be-A	Be-O	Pr-A	Pr-O	Fe-A	Fe-O
CRAD	10	42	50	155	176	191	251	188	252	270

La CRAD en el *Festucion gautieri* es muy baja para el régimen hídrico de la zona (USDA, 1980), lo que podría explicar su escasa producción primaria neta (alrededor de unos 100 g/m² y año). En este sentido, la CRAD se correlaciona significativa y positivamente con la producción primaria neta ($r = 0,63$; $p < 0,05$). Canals *et al.* (1995) remarcan también la baja producción pascícola de esta comunidad en el Valle del Noguera-Ribagorzana. El resto de suelos presentan una CRAD entre moderada y alta, a excepción del *Nardion strictae* de Aísa (Na-A) con contacto lítico a escasa profundidad.

El porcentaje de materia orgánica en los suelos estudiados es elevado, carácter habitual en suelos de prados permanentes y en

pastos (Saña *et al.*, 1996; Porta *et al.*, 1999). La relación C/N de los suelos es próxima a 10, como observan Labroue y Toscà (1977) en suelos de pastos alpinos; por lo tanto, a pesar de las limitaciones que cabría presuponer a la existencia de un régimen térmico crítico, el funcionamiento de la biomasa microbiana no presenta grandes limitaciones y el humus predomina frente a los residuos frescos, los cuales son además pastados.

La capacidad de intercambio catiónico de estos suelos está, en primer lugar, influenciada por la cantidad de materia orgánica, quedando la arcilla granulométrica en un segundo plano, tal y como demuestran las siguientes regresiones ($n = 23$):

CIC (cmol/kg) = 1,253(%MO)+7,812	$r = 0,917$	$p < 0,0001$
CIC (cmol/kg) = 0,453(%Arcilla)-0,113	$r = 0,580$	$p = 0,0037$
CIC (cmol/kg) = 1,087(%MO)+0,261(%Arcilla)	$r = 0,989$	$p < 0,0001$

Es destacable que la materia orgánica, a pesar de ser cuantitativamente muy importante y tener una C/N próxima a 10, presenta una capacidad de cambio relativamente baja, con unos 108,7 cmol/kg; por otro lado, las arcillas con 26,1 cmol/kg, deben tratarse de arcillas ilíticas.

La saturación de bases y el pH actual están, para el conjunto de horizontes ($n = 23$),

significativamente correlacionados ($r = 0,88$; $p < 0,01$). Para los horizontes superficiales caracterizados ($n = 10$), la saturación de bases, como sucedía con la CRAD, se correlaciona significativa y negativamente con la producción primaria neta ($r = -0,65$; $p < 0,05$). Los suelos del *Festucion eskiae* y del *Nardion strictae* son ácidos y fuertemente desaturados, debido al régimen de humedad údico,

percolante, que genera una pérdida de bases por lavado en una geoforma estable, de escasa pendiente. Los suelos del *Bromion erecti* y *Primulion intricatae* presentan una saturación de bases intermedia y localmente heterogénea. Los suelos del *Festucion gautieri* tienden a la neutralidad o a la basicidad y están completamente saturados en bases. En este último caso, la presencia de elementos gruesos de naturaleza caliza supone un suministro de carbonato cálcico a la matriz del suelo, que no es completamente lavado del perfil. Con todo, los carbonatos en el resto de los perfiles se presentan en baja proporción, a pesar de que la mayor parte del material parental está constituido por calcilitas alternantes con calizas, margas y areniscas de cemento calcáreo. Resultados similares han sido obtenidos en otros puntos del Pirineo Central (Badía y Martí, 1999; Broca, 1993; Canals *et al.*, 1995; Sebastià, 1991). Así, Broca (1993), en el valle de Benasque, concluye que los suelos de diversas asociaciones de las alianzas *Nardion strictae* y *Festucion eskiae* son fuertemente ácidos y desaturados en bases, a diferencia de *Bromion erecti*,

donde son ligeramente ácidos y moderadamente saturados en bases mientras que en *Festucion gautieri* son ligeramente básicos y totalmente saturados en bases. De forma similar, se remarca el carácter acidófilo de *Nardion strictae* y *Festucion eskiae* y el basófilo de *Festucion gautieri* en el Pre-pirineo y Pirineo catalán (Sebastià, 1991; Canals *et al.*, 1995).

Génesis y Clasificación de suelos

Los principales procesos formadores en estos suelos son la adición y humificación de la materia orgánica, la meteorización, el empardecimiento y el lavado de carbonatos y bases, procesos definidos en el cercano Pirineo navarro (Iñiguez *et al.*, 1990) y aragonés (Broca, 1993; Badía y Martí, 1999). A diferencia de estos trabajos, no se ha detectado la presencia de argiluviación.

Considerando los parámetros fundamentales para la clasificación de los suelos (saturación de bases, color, materia orgánica, etc) se obtiene un dendrograma que nos muestra, de forma gráfica, la similitud de los mismos (Fig. 1).

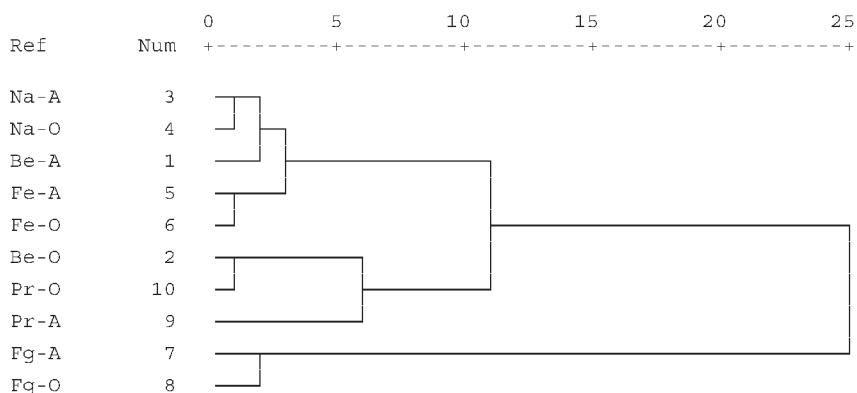


FIGURA 1. Dendrograma de los perfiles de los pastos estudiados: *Nardion strictae* (Na), *Bromion erecti* (Be), *Festucion eskiae* (Fe), *Festucion gautieri* (Fg) y *Primulion intricatae* (Pr), en las localidades de Aísa (A) y Ordesa (O).

La clasificación de los suelos a nivel de unidades, según la Base de Referencia Mundial para los Recursos de Suelos (FAO,

1999), y de subgrupos según *Soil Taxonomy System* (SSS, 1999), se muestra en la tabla 5.

TABLA 5. Clasificación de los suelos de pastos alpinos de Aísa y Ordesa, según la WRB (FAO,1999) y *Soil Taxonom System* (SSS,1999).

ALIANZA VEGETAL- Localidad	WRB (FAO, 1999)	Soil Taxonomy (SSS, 1999)
<i>Nardion strictae</i> -Aísa	Umbrisol lepto-húmico	Dystrocryept lítico-húmico
<i>Nardion strictae</i> -Ordesa	Umbrisol húmico	Dystrocryept húmico
<i>Bromion erecti</i> -Aísa	Phaeozem háplico	Dystrocryept húmico
<i>Bromion erecti</i> -Ordesa	Phaeozem háplico	Eutrocryept húmico
<i>Festucion eskiae</i> -Aísa	Umbrisol húmico	Dystrocryept húmico
<i>Festucion eskiae</i> -Ordesa	Umbrisol húmico	Dystrocryept húmico
<i>Festucion gautieri</i> -Aísa	Leptosol húmico	Cryorthent lítico
<i>Festucion gautieri</i> -Ordesa	Regosol léptico-esquelético	Cryorthent lítico
<i>Primulion intricatae</i> -Aísa	Phaeozem páchico	Eutrocryept húmico
<i>Primulion intricatae</i> -Ordesa	Phaeozem calcárico-esquelético	Eutrocryept húmico

Los horizontes de diagnóstico superficial o epipediones que aparecen en la mayoría de alianzas descritas son ricos en materia orgánica, oscuros y bien estructurados pudiendo clasificarse como móllicos o úmbricos, según la saturación de bases superior o no el 50%. También es frecuente la presencia del horizontes de diagnóstico subsuperficial o endopedión cámbico, horizonte estructurado y con síntomas de alteración, en especial por la movilización o eliminación de carbonatos.

El frecuente horizonte úmbrico o móllico no aparece en la alianza *Festucion gautieri* donde el epipedión no es lo suficientemente oscuro, independientemente de su espesor variable, superpuesto a roca caliza (contacto lítico). Esta alianza, por tanto, se desarrolla sobre una asociación de Leptosoles húmicos y Regosoles lepto-húmicos (esqueléticos y éutricos), según la profundidad a la que aparezca la roca. Ya Broca (1993) observa como la asociación *Seslerio-Festucetum gautieri* en Benasque se desarrolla sobre este mismo tipo de suelos rendziforme. Dado que cumple todos los requisitos para móllico excepto su color, que está en el límite de definición (el

brillo es de 6 en seco y 4 en húmedo), no es descartable la presencia de Leptosoles réndzicos o Phaeozems lepto-esqueléticos en el *Festucion gautieri*. La presencia de delgados endopediones Bw no permite su clasificación como cámbicos por lo que por STS se trataría de Cryorthent líticos, que en condiciones de mayor estabilidad geomorfológica podrían evolucionar a Cryrendolls.

Las alianzas *Nardion strictae* y *Festucion eskiae* combinan el epipedión úmbrico y el endopedión cámbico, clasificándose los suelos como Umbrisoles húmicos (raramente con carácter léptico), equivalentes a los suelos pardos oligotróficos definidos por Broca (1993). Los Umbrisoles son abundantes en el Oeste de la Península Ibérica, aunque las principales superficies las ocupan en las cordilleras sudamericanas y asiáticas (Bridges *et al.*, 1998). La acidez de estos Umbrisoles no constituye una limitación a la producción vegetal puesto que las comunidades pascícolas que albergan son las más productivas.

Los suelos de la alianza *Bromion erecti* poseen epipedión móllico y se clasifican como Phaeozems háplicos por FAO. La

variabilidad en la saturación de bases dentro del perfil supone que en Aísa la STS lo clasifique como Dystrocryept húmico mientras en Ordesa se corresponda con un Eutrocryept húmico. Otras observaciones de los epipediones en esa comunidad y localidad (Badía *et al.*, 2002) ponen de manifiesto que la saturación de bases puede ser inferior al 50% por lo que junto a Phaeozems háplicos pueden encontrarse Umbrisoles húmicos. De todas formas, Broca (1993) considera que los suelos característicos de esta alianza son los suelos pardos eutróficos, equivalentes a los citados Phaeozems. Los Phaeozems son suelos propios de comunidades herbáceas, de zonas relativamente húmedas y templadas, de alta calidad para la producción de pastos. Bridges *et al.* (1998) los considera característicos de las praderas norteamericanas, la pampa sudamericana y la estepa rusa, presentándose a menor escala en el Pirineo (Badía y Martí, 1999; Martí y Badía, 1995) e incluso en ambientes xéricos o áridicos (Badía, 1989; Delgado *et al.*, 2001).

La heterogeneidad en diversas propiedades físico-químicas de los suelos de la alianza *Primulion intricatae* se traslada a la clasificación; así, si bien suelen presentar epipedión móllico sobre un endopedión cámbico, lo que los clasifica como Phaeozems, pueden ser diversas las unidades (páchico, calcárico o háplico) según el espesor del epipedión, la presencia de carbonatos, etc. En cualquier caso se corresponden a Eutrocryepts húmicos por STS.

Hay que recordar que FAO introduce la unidad de los Criosoles con la definición de horizonte crítico que no coincide con el régimen de temperatura crítico (*cryic*) de STS; de ahí que se pueda hablar de Cryepts o Cryorthents en STS que no pertenezcan a la unidad de los Criosoles de FAO (con permafrost), en un ejemplo de la aplicación de términos similares con diferente significado en ambas taxonomías.

CONCLUSIONES

El análisis de los suelos de los pastos de Aísa y Ordesa muestra:

1. Que los suelos de las comunidades del *Nardion strictae* y *Festucion eskiae* se desarrollan sobre Umbrisoles húmicos, suelos de reacción fuertemente ácida y desaturados en bases, con niveles entre moderados y altos tanto de materia orgánica como de capacidad de retención de agua.

2. Que *Bromion erecti* y *Primulion intricatae* se desarrollan sobre Phaeozems, de moderada acidez y saturación de bases. Son suelos con moderada o alta capacidad de retención de agua del perfil edáfico y altos niveles de materia orgánica; se incluyen en diferentes unidades en función de la pedregosidad, el espesor o el contenido en carbonatos.

3. Que los pastos de *Festucion gautieri* crecen sobre suelos de características significativamente distintas al resto, ocupando suelos con escasa e irregular profundidad, elevada pedregosidad, muy baja capacidad de retención de agua, reacción neutra o básica, alta saturación de bases y menor contenido en materia orgánica. Se trata de Leptosoles o Regosoles lépticos, según su espesor.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha contado con la financiación del Proyecto AMB97-0990 (Valoración de pastos permanentes), del Plan Nacional de I+D. Agradecemos sinceramente la colaboración de B. Lalueza y L. Vadillo en el trabajo analítico y la del Dr. Otto Spaargaren en los comentarios sobre la clasificación FAO.

REFERENCIAS

Aldezabal, A. (2001). El sistema de pastoreo del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. Publicaciones del Consejo de

- Protección de la Naturaleza de Aragón. Zaragoza.
- Badía, D. (1989). Los suelos de Fraga. Cartografía y evaluación. Instituto de Estudios Altoaragoneses. Huesca.
- Badía, D.; Martí, C. (2002). Caracterización de suelos: métodos e interpretación de resultados. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Zaragoza.
- Badía, D., Martí, C. Eds. (1999). Suelos del Pirineo Central:Fragen. Huesca.
- Badía, D., Lalueza, B., Vadillo, L., Martí, C., García-Gonzalez, R. (2002). Caracterización edáfica de cinco comunidades pascícolas en los puetos de Aisa y Ordesa (Pirineo Central). *Actas XLII reunión científica de la SEEP*, pp. 147-152. Lleida.
- Basher, L.R., Lynn, I.H. (1996). Soil changes associated with cessation of sheep grazing in the Canterbury High Country, New Zealand. *New Zealand Journal of Ecology*, 20: 179-189.
- Braun-Blanquet, J. (1948). La Végétation Alpine des Pyrénées Orientales. Monografía Estación Estudios Pirenaicos. Jaca.
- Bridges, E.M., Batjes, N.H., Nachtergaele, F.O. (1998). Atlas of World Reference Base for soil resource. Acco ed. Leuven.
- Broca, A. (1993). Caracterización química y físico-química de suelos de pastos del Pirineo Aragonés (Valle de Benasque). Tesis Doc. Fac. de Veterinaria. Zaragoza.
- Canals, R.M., Izquierdo, J., Blanco, R., Olarrieta, J., Sebastià, M.T.(1995). Influencia de los factores edafo-climáticos en la estructura horizontal de algunos pastos alpinos pirenaicos. *XXXV Reunión Científica de la SEEP*, pp. 31-35. Tenerife.
- Delgado, M.J., Ortiz, R., Fernández, M.T. (2001). Caracterización y génesis de Phaeozems desarrollados a partir de rocas volcánicas en ambiente semiárido. *Edafología*, 8: 1-8.
- FAO (1999). World Reference Base for soil resources. World Soil Resources Reports, nº 84 F.A.O.-ISRIC-ISSS. Roma. Ferrer, C. (1981). Estudio geológico, edáfico, y fitoecológico de pastos del valle de Tena (Huesca). Edita Instituto Fernando El Católico. Zaragoza.
- García-González, R., Gómez, D., Remon, J.L. (1991). Structural changes in supra-forestal pastures due to current annual growth and grazing in the Western Pyrenees (Spain). *IV th Int Rangeland Congress*. pp. 122-126. Montpellier.
- Haynes, R.J., Williams, P.H. (1993). Nutrient cycling and soil fertility in the grazed pasture ecosystem. *Advances in Agronomy*, 49: 119-199.
- IGME (1982). Mapa geológico de España. Hoja 178. Ministerio de Industria y Energía. 60 pp.+ mapa. Madrid.
- Iñiguez, J., Sánchez-Carpintero, I., Val, R.M., Garjón, S., Vitoria, G., Peralta, J. (1990). Mapa de suelos de Navarra. Hojas 117, 118 y 91 bis. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Navarra. Pamplona.
- Labroue, L., Tosca, C. (1977). Dynamique de la matière organique dans les sols alpins. *Bull. Ecol.*,8 (3): 289-298.
- Marinas, A., García-González, R., Gómez-García, D. (2002). Valoración forrajera de los pastos de *Festuca gautieri* (Hackel) K. Richt en el Pirineo aragonés. *Actas XLII reunión científica de la SEEP*, pp. 251-256. Lleida.
- Martí, C., Badía, D. (1995). Characterization and classification of soils along two altitudinal transects in the Eastern Pyrenees (Spain). *Soil Research and Rehabilitation*, 9: 367-383.
- Ministerio de Agricultura (1974). *Mapa de cultivos y aprovechamientos*. E. 1:50.000. Hojas: 118, 144 a 148 y 176 a 180. Madrid.
- Montserrat, P., Fillat, F. (1990). The systems of grassland management in Spain. In:

- Managed grasslands*, pp. 37-70. A. Breymeyer (ed.). Elsevier. Amsterdam.
- Porta, J., López-Acevedo, M., Roquero, C. (1999). Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ed. Mundi-Prensa. 2ª edición. Madrid.
- Piekowski, M.W., Bignal, E.M., Galbraith, C.A., Stillman, R.A., Boobyer, M.G. (1996). A simplified classification of land type zones to assist the integration of biodiversity objectives in land-use policies. *Biol. Conserv.*, 75: 11-25.
- Quémener, J. (1985). L'interpretacion des analyses. *Cultivar*, 22: 107-117.
- Remón Aldabe, J.L. (1997). Estructura y producción de pastos en el Alto Pirineo Occidental. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias de la Universidad de Navarra.
- Remón, J.L., Gómez, D. (1989). Plant communities and its altitudinal distribution in the Aisa's summer range (Central Pyrenees). *Acta Biologica Montana*, 9: 283-290.
- Rivas-Martínez, S. (1991). Vegetación del Pirineo occidental y Navarra. *Itinera Geobotanica*, 5: 189-201.
- Saña, J., Moré, J.C., Cohí, A. (1996). *La gestión de la fertilidad de los suelos*. MAPA. Madrid.
- Sebastià, M.T. (1991). Els prats alpins prepirinencs i els factors ambientals. 351 pp. Tesis Doctoral. Facultat de Biologia. Universitat de Barcelona.
- SSS. (1999). Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Soil Survey Staff. 2nd ed. USDA-NRCS. Washington.
- SPSS. (1999). SPSS Base 9.0: User's guide. SPSS Inc., Chicago Illinois.
- Villar, L., Benito, J.L. (1994). Esquema de la vegetación del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido, más su zona periférica. *Lucas Mallada*, 6: 235-273.

EROSIÓN HÍDRICA EN ANDOSOLES DE LAS ISLAS CANARIAS

A. RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, C.D. ARBELO, J.A. GUERRA, J.L. MORA

Dpto. Edafología y Geología, Facultad de Biología, Universidad de La Laguna, Avda. Astrofísico Francisco Sánchez s/n, 38204, La Laguna, Tenerife (Islas Canarias).
antororo@ull.es

Abstract. This paper shows the results of water erosion rate measurements in andosols, through a continued 9-year field experiment in three experimental plots (25 x 8 m) representing bare soil, planted pine forest and shrub.

The highest runoff and erosion rates have been registered in the bare soil plot, although they are not clearly related to the rainfall intensity or soil erodibility, estimated by conventional methods.

Sediment analysis shows that erosion processes in these soils affect mainly the microgranular and crumb aggregates, which are mobilized with no previous dispersion, thus suggesting that the hydrophobicity of organic surface horizons in these soils, as well as their high moisture retention capacity and infiltration rates, once they are wet, are the properties that determine in the highest degree the runoff and sediment yield in these soils, in these conditions.

Key words: Andosols, Water erosion, Experimental plots, Runoff, Canary Islands

Resumen. En este trabajo se presentan los resultados de un seguimiento de las tasas de erosión hídrica en andosoles, durante nueve años, en tres parcelas experimentales de 25 x 8 m: suelo desnudo, pinar de repoblación, matorral.

Las mayores tasas de escorrentía y erosión se generan en la parcela con suelo desnudo, aunque sin una clara relación con la intensidad de las lluvias ni con la erodibilidad del suelo estimada por los métodos convencionales.

El análisis de los sedimentos muestra que la erosión de estos suelos afecta fundamentalmente a los microagregados granulares y migajosos que se movilizan sin dispersión previa, sugiriéndose que la hidrofobicidad de los horizontes orgánicos superficiales de estos suelos y su elevada capacidad de retención de agua e infiltración una vez humectados, son las propiedades que en mayor medida condicionan la producción de escorrentía y sedimentos en este tipo de suelos, en estas condiciones.

Palabras clave: Andosoles, Erosión hídrica, parcelas experimentales, escorrentía, Islas Canarias

INTRODUCCIÓN

Los Andosoles y suelos con carácter ándico son los suelos que ocupan una mayor extensión en las áreas forestales de las islas

de mayor altitud en el archipiélago canario y al mismo tiempo son los suelos que presentan mayor interés como suelos más característicos de aquellos derivados de materiales vol-

cánicos y por tanto, soporte de ecosistemas de elevado interés ambiental para estas islas.

La degradación de los suelos y en particular la erosión hídrica es uno de los factores que más contribuye al creciente proceso de desertificación que se observa en algunas zonas de las islas (Rodríguez Rodríguez *et al.*, 1993a,b,1998; Rodríguez Rodríguez,2002). Como es lógico suponer los andosoles y otros suelos ándicos no escapan a este fenómeno general de degradación por procesos de erosión hídrica, fenómeno que se ha intensificado en los últimos años en algunas áreas, como consecuencia fundamentalmente de la fuerte presión demográfica asociada al incremento de la actividad turística y la inmigración. Se han realizado deforestaciones, repoblaciones y revegetaciones con especies forestales agresivas (*Eucalyptus sp.*, *Pinus radiata*, etc.), apertura de caminos y pistas forestales sin ninguna medida de corrección de taludes y se ha abandonado el uso tradicional de las tierras agrícolas asociadas al monte, con lo que se ha roto los frágiles equilibrios suelo-vegetación-uso y manejo del territorio, desencadenándose así los procesos de erosión y de pérdida de un recurso vital en las áreas de montaña de las islas, no sólo por su valor intrínseco de recurso natural no renovable, sino también por la importante incidencia que tiene sobre el mantenimiento de una vegetación forestal, la infiltración de agua y la recarga de acuíferos y en definitiva sobre el ciclo hidrológico, en un territorio absolutamente dependiente de los recursos de aguas subterráneas.

La peculiar composición mineralógica de los suelos ándicos, es la responsable de la existencia de unas propiedades físicas y mecánicas particulares en estos suelos (Fernández Caldas y Tejedor,1975; Warkentin and Maeda,1980; Meurisse,1985; Quantin,1994). Así, la baja densidad aparente, la elevada estabilidad estructural, la alta microporosidad y capacidad de retención de agua, alta conductividad hidráulica y veloci-

dad de infiltración de agua y los altos límites de plasticidad, están estrechamente relacionados con la presencia de alofanos, imogolita y otros minerales con ordenación de corto alcance, y con una particular manera de asociarse entre sí y con los compuestos orgánicos, generando estructuras con elevado grado de agregación y alta estabilidad, responsables últimas de aquellas propiedades.

Todas estas características están en íntima relación a su vez con las características de erodibilidad de los suelos ándicos y de ahí que los procesos de erosión en suelos con un predominio de minerales con ordenación de corto alcance en la fracción fina, presenten también unos rasgos diferenciales respecto a los suelos con una mineralogía dominada por arcillas cristalinas (Yamamoto and Anderson,1973; El-Swaify and Dangler,1977; Kubota *et al.*,1990; Pla,1992).

La erosión hídrica en suelos ándicos ¿Cuál es el problema?

Se admite generalmente que en condiciones normales el grado de erosión hídrica en los andosoles es bajo. En efecto, una alta cubierta vegetal, la baja erosividad de las lluvias en las áreas en las que estos suelos aparecen y una muy baja erodibilidad de acuerdo con los índices normalmente usados, parecen ser los responsables de esto.

Sin embargo, en muchos casos y particularmente cuando se producen cambios en el uso y manejo de estos suelos, se desencadenan importantes eventos erosivos que pueden incluso afectar a la totalidad del suelo, dejando numerosos afloramientos rocosos en superficie.

Esta aparente controversia parece deberse al hecho de que los índices normalmente usados para evaluar la erodibilidad del suelo no son aplicables a los suelos ándicos, obteniéndose muy bajos valores de erodibilidad para estos suelos, lo cual no se corresponde con los rasgos observados en la realidad. El índice de erodibilidad (índice K de

Wischmeier) utilizado en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) (Wischmeier *et al.*, 1971, 1978), que es uno de los índices más ampliamente usado en la estimación de la erodibilidad de los suelos, generalmente no ha funcionado cuando se ha aplicado a suelos con carácter ándico y andisoles (Jungerius, 1975; El-Swaify and Dangler, 1977; Plá, 1990; Ortega *et al.*, 1991), dando como resultado una susceptibilidad muy baja a la erosión hídrica.

METODOLOGÍA DE ESTUDIO

Con objeto de conocer la pérdida real de suelos y la velocidad de generación de escorrentía en los andosoles, así como otros parámetros relacionados con la erodibilidad y los procesos de erosión, se ha llevado a cabo un estudio de los mismos en parcelas experimentales.

El área de estudio consiste de tres parcelas de 200 m² cada una (25 x 8 m). En una de ellas el suelo se mantiene desnudo y con un laboreo anual (24% de pendiente), en otra situada a unos 20 m de la anterior, la vegetación consiste de un pinar de repoblación (*Pinus radiata*) con una densidad del 60% (13% de pendiente) y la tercera contigua a la primera, está colonizada por la vegetación espontánea (matorral) que surge luego de la deforestación (pendiente del 24%). Los datos de las parcelas experimentales se han registrado durante un periodo de nueve años (1993-2001), tomando muestras de sedimentos y escorrentía para su análisis luego de cada evento lluvioso de importancia.

Los suelos de las tres parcelas son Andosoles úmbricos (WRB, 1998) (Hapludands típicos, USDA, 1999), que son los que con mayor frecuencia se encuentran en las zonas altas de las islas. Estos suelos se han desarrollado a partir de piroclastos y lavas básicas e intermedias del Pleistoceno

Superior y presentan un horizonte superficial profundo (70 cms) de color pardo muy oscuro, casi negro. En este horizonte, pueden sin embargo diferenciarse dos subhorizontes, uno superficial con estructura grumosa muy fina (horizonte A₁₁) y otro más profundo con estructura masiva (horizonte A₁₂). Por debajo de los 70 cms se encuentra un horizonte de alteración de piroclastos de color pardo amarillento, limoarcilloso y con estructura masiva (horizonte Bw).

El perfil del suelo es similar en las tres parcelas, con sólo ligeras variaciones en el espesor de los horizontes, como consecuencia de la diferente pendiente y de la incidencia diferencial de la erosión. Algunas propiedades físicas y químicas de estos suelos se presentan en la Tabla 1. La clasificación de estos suelos en el Orden Andisol se verificó por medio de: (1) contenido de Al_{oxalato} + 1/2 Fe_{oxalato} superior al 2%, (2) densidad aparente a 33 kPa menor de 0,9 MgM⁻³ y (3) retención de fosfato superior al 85%.

RESULTADOS

Características de las lluvias

La pluviometría media en esta zona durante el periodo de estudio ha sido de 617 mm (Tabla 2), con una elevada variabilidad tanto mensual como interanual (Tabla 3). Las tormentas más erosivas se concentran en eventos muy aislados en los meses de Febrero-Marzo y Octubre-Noviembre. La intensidad máxima de lluvia (242 mmh⁻¹) se registró en Noviembre de 1995 (Tabla 3), aunque por lo general las intensidades máximas oscilan entre 30 y 80 mmh⁻¹ y la I₃₀ más alta (41,2 mmh⁻¹) correspondió a las lluvias de octubre de 1999, variando el valor de R-USLE acumulado entre 194 Mjha⁻¹mmh⁻¹ (2001) y 1220 Mjha⁻¹mmh⁻¹ (1999), con una media interanual de 640 Mjha⁻¹mmh⁻¹.

TABLA 1.- Características físicas y químicas del perfil del suelo de las parcelas

Horizonte (Profundidad)	O+A ₁₁ (0-25 cm)	A ₁₂ (25-70 cm)	Bw (70-130 cm)
Contenido de agua (%) (seco)			
1/3 bar	69	63	56
15 bar	40	42	40
Contenido de agua (%) (húmedo)			
1/3 bar	76	69	82
15 bar	48	44	67
Densidad aparente a 1/3 bar (MgM⁻³)	0.4	0.5	0.5
Conductividad hidráulica saturada (mmh⁻¹)	168	43	133
Elementos gruesos (>2 mm) (gkg⁻¹)'	61	58	65
Arcilla (gkg ⁻¹)'	190	380	564
Limo (gkg ⁻¹)'	714	496	389
Arena fina (gkg ⁻¹)'	41	34	32
Arena gruesa (gkg ⁻¹)'	22	63	16
pH (H ₂ O,1:2,5)	6.0	5.8	5.8
pH (KCl,1:2,5)	4.9	4.9	5.5
Materia orgánica (gkg⁻¹)	250	118	35
Retención de P (%)''	95	96	94
CCC (cmol.kg⁻¹)'''	57	54	42
Alo+1/2Feo	4.5	5.8	7.6
Mineralogía de la fracción arcilla	Hem, Verm, Ilita	Hem, Gib,Verm, Ilita	Hem, Verm, Ilita

'Textura: Método de las resinas sódicas (Bartoli et al.,1991). ''Blakemore et al.,1981. '''Mehra and Jackson,1960. Hem: Hematites, Verm: Vermiculita, Gib: Gibsita

TABLA 2.- Valoración Global del ciclo hidrológico y de erosión (años 1993-2001)

Parcela	P (mm)	Escorrentía (%)	Infiltración (%)	Erosión (Tmha-1año ⁻¹)	Imáx (mmh ⁻¹)	I30 (mmh ⁻¹)	R (Mjha-1mmh ⁻¹)
Suelo desnudo	616,8	14,5	85,5	9,9	242	41,2	640
Vegetación natural	616,8	0,25	99,75	0,0	242	41,2	640
Pinar de reforestación	616,8	0,26	99,74	0,0	242	41,2	640

Tasas de erosión

La producción de sedimentos y por tanto las tasas de erosión son muy variables tanto entre años como mensualmente, derivado de la variabilidad de los episodios lluviosos y

del estado de la superficie del suelo. Durante el periodo considerado se ha producido una media de pérdida de suelo de 9,9 Tmha-1año⁻¹ en la parcela deforestada y labrada, mientras que en las parcelas con vegetación la pérdida

de suelo fue prácticamente nula. Sólo la parcela deforestada y con vegetación natural presentó una cierta pérdida de suelo en el primer año, debido al escaso desarrollo de la vegetación, ya que la deforestación era aún reciente.

La tasa máxima de erosión (28,9 Tmha⁻¹año⁻¹) en estos años se registró en la parcela labrada en el año 1993, coincidiendo con el inicio de las medidas y con una mayor perturbación en la superficie del suelo, siendo

Noviembre de ese mismo año el mes que alcanzó la máxima producción de sedimentos (1321 gm⁻²) con una pluviometría total de 224 mm y la mayor descarga sólida se produjo en la misma parcela, entre los días 23 y 24 de Marzo de 1997, con 615 gm⁻². Los meses de mayor producción de sedimentos son los de otoño e invierno, coincidiendo con el mayor número de días de lluvia y con las lluvias más intensas.

TABLA 3.- Balance anual: Parámetros de lluvia, erosión y escorrentía

Lluvia	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
P (mm)	870	443	511	667	811	403	889	627	329
Imax (mmh ⁻¹)	60	31	242	84	45	52	82	43	43
I30 (mmh ⁻¹)	15,5	15,7	11,6	14,8	17,9	14	41,2	32,4	7,0
R(Mjha1mmh ⁻¹)	828	398	342	497	959	435	1220	886	194
Producción de sedimentos (Tmha⁻¹ año⁻¹)									
Suelo desnudo	28,9	8,7	5,6	17,4	14,9	3,0	9,5	0,82	0,41
Vegetación natural	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Pinar de reforestación	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Escorrentía (%)									
Suelo desnudo	10,9	18,2	30,5	23,4	13,0	19,8	8,7	3,6	2,1
Vegetación natural	0,6	0,3	0,1	0,3	0,3	0,2	0,14	0,3	0,2
Pinar de reforestación	0,4	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3

Escorrentía superficial

En lo que se refiere a la generación de escorrentía, las parcelas provistas de una cubierta vegetal (vegetación natural o pinar) producen siempre unos volúmenes de escorrentía inferiores al 0,6% de la pluviometría total, independientemente de cual haya sido la precipitación total anual. Sin embargo en la parcela labrada y con suelo desnudo el volumen de escorrentía oscila entre el 10 y el 31% de la pluviometría (Tabla 2).

En estos andosoles se observa un porcentaje de escorrentía medio del 14,5% (89,4 Lm⁻²) en los suelos desprovistos de vegetación y del 0,25-0,26% (1,5-1,6 Lm⁻²) cuando existe una cubierta vegetal (Tabla 2). Así

pues, la escorrentía generada es relativamente baja, predominando la infiltración y aunque pueden superarse estos valores medios para eventos concretos, las cifras más altas medidas hasta ahora no superan el valor del 42% ni aún con las lluvias más abundantes e intensas. Al igual que para los sedimentos, los meses de máxima producción de escorrentía son los de otoño-invierno, con una elevada variabilidad interanual.

Características de los sedimentos

Las características físicas de los sedimentos (muestreados durante 65 episodios erosivos) son similares a las que presentan los horizontes superficiales de los andosoles,

salvo para el contenido en arcilla que es claramente superior en los sedimentos (Tabla 4). Esto demuestra que la fracción arcilla es la fracción granulométrica que se moviliza con mayor facilidad, aunque no en estado disperso, sino en forma de pequeños agregados gra-

nulares y migajosos de elevada estabilidad, de tal manera que más del 50% de los sedimentos (527 gkg⁻¹) están constituidos por agregados de tamaño comprendido entre 0,1 y 1,0 mm (Tabla 4).

TABLA 4.- Características físicas de los sedimentos

	Media (gkg ⁻¹)	Coefficiente de variación
Granulometría*		
Elementos gruesos	19	19.2
Arcilla	383	11.8
Limo	572	22.3
Arena	47	19.1
Tamaño de agregados (mm)**		
>6.3	32	82
6.3-4.0	60	39
4.0-3.2	54	23
3.2-2.0	122	22
2.0-1.0	175	24
1.0-0.5	162	20
0.5-0.1	365	27
Arcilla dispersa, limo y arena	30	38

n= 65 *Método de las resinas sódicas (Bartoli et al.,1991) **Tamizado húmedo

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los rasgos morfológicos de erosión observados a veces en estos suelos, correlacionan mejor con variables ambientales y de uso y manejo del suelo que con propiedades intrínsecas del mismo, tales como la erodibilidad (factor K). Factores tales como pendientes superiores al 30%, cobertura vegetal inferior al 60%, elevada erosividad de las lluvias fuertemente estacionales y otros factores antrópicos de uso del suelo, determinan en mayor medida que la erodibilidad en sí misma, el grado y la intensidad de la morfología erosiva (Ortega *et al.*, 1992).

La hipótesis sugerida es que la erosión hídrica en andosoles y suelos ándicos puede tener lugar mediante un mecanismo que en ningún caso supone la dispersión de las partículas previa a su movilización por el flujo superficial. La movilización de las partículas tiene entonces lugar en forma de agregados altamente estables a la dispersión en agua.

La producción de sedimentos en la parcela labrada no parece estar estrechamente correlacionada con las características de la lluvia de cada evento, obteniéndose coeficientes de 0,7 (I_{max} e I_{30}), 0,6 (R) y 0,5 (P), por lo que probablemente las características físicas de los andosoles y el estado de hume-

dad del suelo en el momento de las lluvias, expliquen mejor la producción de sedimentos en estas condiciones.

Así la mayor producción de sedimentos y escorrentía tiene lugar con las lluvias que caen sobre suelo seco. Dada la conocida hidrofobicidad de los horizontes orgánicos superficiales de los andosoles, con el suelo seco se genera una elevada escorrentía que arrastra los agregados de la superficie del suelo desnudo, independientemente de la intensidad de la lluvia caída. Luego de la lenta humectación del suelo, la velocidad de infiltración elevada y sobre todo, la alta capacidad de retención de agua de estos suelos (hasta 300 mL/100 g), hacen que la generación de escorrentía sea muy baja y sólo se produzca ésta con ocasión de lluvias de alto volumen de agua caída (independientemente de su intensidad) que entonces arrastra mediante flujo laminar, los agregados humectados que han sido fragmentados por el impacto de gota de lluvias previas de elevada intensidad.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el marco del Convenio "Contribución Española al Convenio Mundial de Lucha Contra la Desertificación. I.-Red de Estaciones Experimentales de Seguimiento y Evaluación de la Erosión y la Desertificación (RESEL)" entre el Ministerio de Medio Ambiente (Proyecto LUCDEME) y la Universidad de La Laguna.

REFERENCIAS

- Bartoli, F.; Burtin G. and Herbillon, A.J. (1991). Disaggregation and clay dispersion of Oxisols: Na resin, a recommended methodology. *Geoderma*, 49:301-317
- Blakemore, L.C.; Searle, P.L. and Daly, B.K. 1981. Soil Bureau Laboratory Methods. A: Methods for chemical analysis of soils. NZ Soil Bureau Scientific Report 10 A, CSIRO, New Zealand.
- El-Swaify, S. and Dangler, E.W.(1977). Erodibility of selected tropical soils in relation to structural and hydrological parameters. In: "Soil Erosion: Prediction and Control". Soil Cons. Soc. of Am. Ankeny (USA):105-114.
- Fernández Caldas, E. y Tejedor, M.L.(1975): Andosoles de las Islas Canarias. Servicio de Publicaciones de la Caja General de Ahorros de S/C de Tenerife, 210 p.
- Jungerius, P.D. (1975). The properties of volcanic ash soils in dry parts of the Columbia Andes and their relation to soil erodibility. *Catena*, 2: 69-80
- Kubota, T.; Ishihara, A.; Taniyama, I.; Katou, H.; Osozawa, S. (1990). Erodibility of Andosols in Japan. Nat. Inst. of Agro-Environ. Sci. Ibaraki (Japan) (mimeo).
- Mehra O.P. and Jackson M.L. (1960). Iron oxides removal from soils and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. Clays and Clay Minerals, Proceed. 7th Nat. Conf., Monograph 5, Earth Science Series. Pergamon Press. New York, 317-327.
- Meurisse, R.T.(1985). Properties of Andisols important to forestry. In: "Taxonomy and management of Andisols". Proceed. Of Sixth Int. Soil Classif. Workshop. Soc. Chilena de la Ciencia del Suelo:53-67.
- Ortega, M.J.; González, M.C.; Hernández, L.A.; Jiménez, C.C.; Padrón, P.A.; Rodríguez Rodríguez, A.; Torres, J.M. y Vargas, G.E.(1991). La erodibilidad de los suelos de origen volcánico. Datos preliminares. Comunicaciones a la XVIII Reunión Nacional de Suelos. Universidad de La Laguna. Tenerife.:471-484.
- Ortega, M.J., González, M.C., Padrón, P.A. y Rodríguez Rodríguez, A.(1992). Estudio de las propiedades físicas de los horizontes superficiales de los suelos volcánicos

- de Canarias. Su influencia en la erodibilidad. Comunicaciones. III Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Universidad de Navarra. Pamplona: 564-567
- Pla, I. (1990). Methodological problems to evaluate soil physical degradation. Trans. 14th Int. Cong. of Soil Sci. Japan. I: 96-100.
- Pla, I. (1992). La erodabilidad de los Andisoles en Latinoamérica. *Suelos Ecuatoriales*, Vol. 22(1): 33-43.
- Quantin, P. (1994). The andosols. Trans. 15th World Congr. Of Soil Sci. Mexico. Vol. 6^a: 848-859.
- Rodríguez Rodríguez, A., González, M.C., Hernández, L.A., Jiménez, C., Ortega, M.J., Padrón, P.A., Torres, J.M., Vargas, G.E. (1993a): Assessment of Soil Degradation in the Canary Islands (Spain). *Land Degradation & Rehabilitation*, 4: 11-20.
- Rodríguez Rodríguez, A., González, M.C., Hernández, L.A., Jiménez, C., Ortega, M.J., Padrón, P.A., Torres, J.M., Vargas, G.E. (1993b): Degradación y Conservación de Suelos en las Islas Canarias. En: "Problemática Geoambiental y Desarrollo" (R. Ortiz Ed.). Universidad de Murcia. 415-423.
- Rodríguez Rodríguez, A., Jiménez, C., Tejedor, M.L. (1998). Soil degradation and desertification in the Canary Islands. In: "The soil as a strategic resource: degradation processes and conservation measures" (A. Rodríguez Rodríguez et al. Eds.) Geoforma Ediciones, Logroño. 13-22
- Rodríguez Rodríguez, A. (2002). Erosión y Desertificación. En: "Naturaleza de las Islas Canarias. Ecología y Conservación" (J.M. Fernández Palacios y J.L. Martín Esquivel Eds.) Ed. Turquesa, S/C de Tenerife. 317-322
- USDA. (1999) Keys to Soil Taxonomy. Pocahontas Press, 8th edition, Virginia, USA, 599 p.
- Warkentin, B.P. and Maeda, T. (1980). Physical and mechanical characteristics of Andisols. In: "Soils with variable charge" (B.K.G. Theng Ed.) N.Z. Soc. of Soil Science. Lower Hutt, New Zealand: 281-301.
- Wischmeier, V.H., Johnson, C.B. and Cross, B.V. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *J. of Soil and Water Cons.* 26(5): 189-193.
- Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. U.S. Dept. of Agric. Agric. Handbook n° 537, 58 p.
- WRB (1998) World Reference Base for Soil Resources. FAO, ISRIC, ISSS, Rome, 88 p.
- Yamamoto T. and Anderson H.W. (1973). Splash erosion related to soil erodibility and other forest soil properties in Hawaii. *Water Resour. Res.* 9: 336-345.

CALIDAD DEL SUELO Y SUCESIÓN VEGETAL EN ANDOSOLES FORESTALES DE LAS ISLAS CANARIAS

C.D. ARBELO, A. RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, J.A. GUERRA, J.L. MORA

Dpto. Edafología y Geología, Facultad de Biología, Universidad de La Laguna, Avda. Astrofísico Francisco Sánchez s/n, 38204, La Laguna, Tenerife (Islas Canarias). antororo@ull.es

Abstract. Soil quality is closely related to processes of ecological succession. The degradation of an ecosystem causes a decrease in soil quality and a simultaneous regression in plant succession. The aim of this work is to study regeneration processes of the vegetation on forest andosols in an area within the Garajonay National Park (island of La Gomera, Canary Islands) and determine the variations in the soil quality associated with plant succession. The results obtained show that the plant formations with a lesser degree of regeneration are associated with processes of leptosolization, erosion, compactation and mineralization of organic matter, while the communities closer to the climax present important improvements in soil quality, tending towards andosolization.

Key words: Andosols, Soil quality, Plant succession, Laurel forest, Leptosolisation, Andosolisation, Canary Islands

Resumen. La calidad de los suelos está estrechamente relacionada con los procesos de sucesión ecológica. La degradación de los ecosistemas por regla general trae consigo una disminución en la calidad de los suelos y una regresión en la sucesión vegetal. El objetivo del presente trabajo es estudiar los procesos de regeneración de la vegetación en los andosoles de un área fuertemente perturbada situada en el Parque Nacional de Garajonay y comprobar las variaciones en la calidad del suelo asociadas a dicha recuperación. Los resultados obtenidos señalan que las comunidades vegetales con un menor grado de regeneración se asocian siempre a procesos de leptosolización, erosión, compactación de la superficie del suelo y mineralización de la materia orgánica, mientras que aquellas comunidades más próximas a la climax presentan sustanciales mejoras en la calidad de los suelos que tienden hacia la andosolización.

Palabras clave: Andosoles, Calidad del suelo, Sucesión vegetal, Laurisilva, Leptosolización, Andosolización, Islas Canarias

INTRODUCCIÓN

El término sucesión se aplica a los cambios secuenciales que ocurren a lo largo del tiempo, en la abundancia de las especies de un ecosistema. En los ecosistemas forestales, la sucesión lleva en sus estadios finales a una

vegetación arbórea estable, en equilibrio con las condiciones ambientales. Los suelos que se desarrollan bajo una vegetación madura, climática presentan una alta calidad ambiental y funcionan como sistemas en equilibrio, activos y estables (Fisher and Binkley, 2000; Doran and Parkin, 1996). La sucesión vegetal

es así, un proceso dinámico progresivo-regresivo asociado a variaciones en las características del suelo, de tal modo que la evolución de un ecosistema degradado hacia las condiciones climáticas ha de hacerse a través de un proceso de regeneración de la calidad del suelo (Rodríguez Rodríguez *et al.*, 2001a, 2002a,b).

Los andosoles con vegetación forestal en las Islas Canarias son suelos con una elevada calidad ambiental que juegan un importante papel en la regulación del ciclo hidrológico y en el mantenimiento de un ecosistema relicto único, como es la laurisilva, a su vez hábitat de numerosas especies exclusivas y amenazadas de extinción. Las manifestaciones más extensas y diversas y mejor conservadas de estas formaciones boscosas, se encuentran en el Parque Nacional de Garajonay (La Gomera), donde se ha realizado este trabajo, catalogado desde 1986 por la UNESCO como Bien Natural Patrimonio de la Humanidad.

El objeto del presente trabajo es pues, analizar la variación en la calidad del suelo asociada con la regeneración de la vegetación en un área de laurisilva, profundamente transformada por intervenciones antrópicas durante siglos.

AREA DE ESTUDIO

La zona más alterada y antropizada del Parque Nacional de Garajonay, ocupa una superficie de 525 has. (13% de la superficie total del Parque) al Sureste del mismo entre 1100 y 1435 m de altitud sobre el nivel del mar. Es una zona localizada en la vertiente Sur de la isla de La Gomera, a sotavento de los vientos alisios, pero bajo la influencia permanente de las nieblas que tienen su origen en el "mar de nubes" (Arozena, 1990). El edafoclima en la zona es "údic" con tendencia a "ústico" y los suelos predominantes son Andosoles háplicos, Umbrisoles húmicos y Cambisoles ándicos con áreas de Andosoles

lépticos y Leptosoles úmbricos y líticos (Jiménez *et al.*, 1990, Rodríguez Rodríguez *et al.*, 2001a).

Como hemos dicho, esta zona ha estado sometida durante más de cuatro siglos a una intensa presión antrópica, principalmente por el pastoreo extensivo y los aprovechamientos forestales, lo que ha llevado a la sustitución del bosque original por matorrales de brezos (Ericáceas) y codesos (Leguminosas). En los años 60 se realizaron además, plantaciones de pinos y otras coníferas, lo que trajo consigo la frecuente aparición de incendios forestales en la zona. En los últimos años, la administración del Parque ha implementado un plan para la eliminación selectiva de las plantaciones de coníferas y la restauración progresiva del bosque original (Arco, *et al.*, 1990; Fernández, 1990).

MATERIAL Y MÉTODOS

El muestreo se llevó a cabo en 73 parcelas integradas en la Red de Seguimiento Ecológico del Parque Nacional de Garajonay situadas a intervalos regulares de 250 m por toda el área estudiada. Se realizó una descripción morfológica completa del suelo y del entorno ambiental en cada punto de muestreo (parcela) y se tomó una muestra completa de tres réplicas, en los primeros 30-35 cm del suelo, que son los más sensibles a las variaciones de la calidad del suelo.

En el laboratorio se analizaron diversas propiedades físico-químicas relacionadas con el carácter ándico de los suelos, su capacidad para sustentar la productividad vegetal, funcionamiento hídrico, incidencia de procesos de degradación y su sensibilidad a éstos, hasta un total de 48 determinaciones analíticas por muestreo. A saber: estado de humedad, densidad aparente a 33 kPa, granulometría y textura, capacidad de retención de agua a 33 y 1500 kPa, estabilidad de agregados (impacto de gota y tamizado en húmedo), pH en agua, KCl y NaF, conductividad eléctrica,

caciones cambiables, fósforo asimilable, micronutrientes biodisponibles, retención de fosfato, Fe, Al, Si extraíbles con ácido oxálico-oxalato amónico y con pirofosfato sódico, ácidos húmicos y fúlvicos, índice melánico, carbono orgánico total y extraíble con pirofosfato sódico, nitrógeno total. Muchas de estas propiedades son ampliamente reconocidas como indicadoras de calidad de suelos forestales (Schoenholtz *et al.*,2000).

Con el fin de delimitar las principales comunidades vegetales presentes en la zona se realizó una matriz de abundancia de las diferentes especies, que fue posteriormente analizada mediante técnicas estadísticas de análisis multivariante: un Sistema de Clasificación Jerárquica Divisivo mediante TWINSpan (Hill,1979) y un Sistema de Ordenación mediante un Análisis de Correspondencia Corregido (DCA) (Hill y Gauch,1980).

Una vez establecidas las principales comunidades vegetales, se analizaron las características de los suelos asociados a cada comunidad por medio de las pruebas ANOVA y Tukey para el caso de las variables paramétricas y las de Kruskal-Wallis y U de Mann-Whitney en el caso de aquellas no paramétricas. Las relaciones existentes entre la composición florística de las comunidades vegetales y las propiedades del suelo se estableció mediante un Análisis Canónico de Correspondencia (CCA)(Ter Braak, 1986).

RESULTADOS

El análisis de la vegetación por medio de TWINSpan y DCA, permite diferenciar en la zona estudiada, al menos cuatro comunidades vegetales naturales (Figura 1).

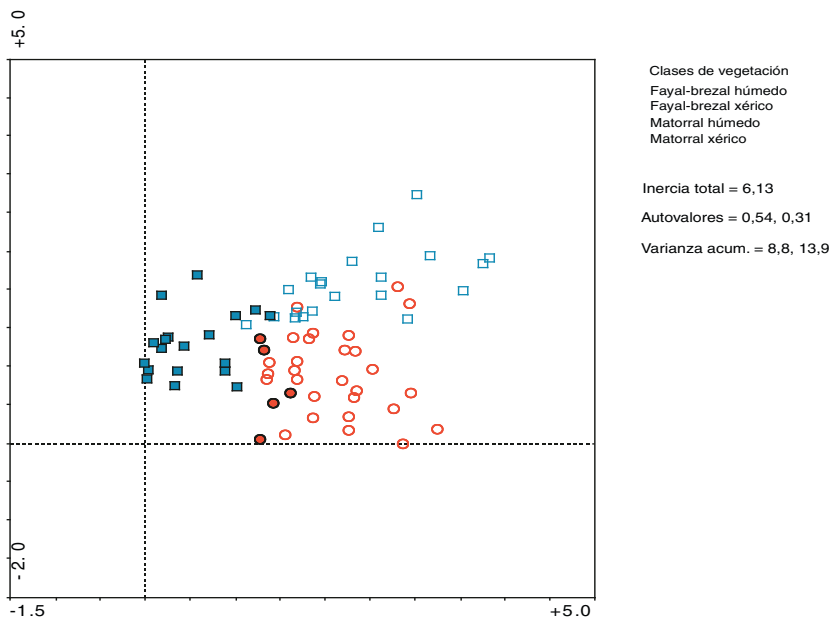


FIGURA 1.-Análisis de la vegetación mediante TWINSpan y DCA

Valores del DCA: Inercia total: 6,137, Autovalores: 0,538, 0,313, Varianza acumulativa (%): 8,8;13,9

Fayal-Brezal húmedo: Caracterizado por la presencia de especies arbóreas (*Erica arborea*, *Myrica faya*, *Laurus azorica*) y por plantas con preferencia por los ambientes húmedos y sombreados (*Viola riviniana*).

Fayal-Brezal xérico: en este caso las especies arbóreas características (*E. arborea*, *M. faya*, *L. azorica*) están acompañadas por un sotobosque típico de sitios secos y soleados (*Chamaecytisus proliferus*).

Matorral húmedo: comunidad vegetal de escaso porte en la que abundan las especies más características de ambientes húmedos, tales como el *Pteridium aquilinum*.

Matorral xérico: formación de matorral caracterizada por la presencia de especies fotófilas tales como el *Ch. proliferus*.

El análisis CCA nos indica cuales son las propiedades ambientales y edáficas más relevantes a la hora de explicar la vegetación de las diferentes parcelas (Figura 2)

Los resultados de la comparación de las propiedades del suelo entre las diferentes comunidades vegetales, aparecen en la Tabla 1.

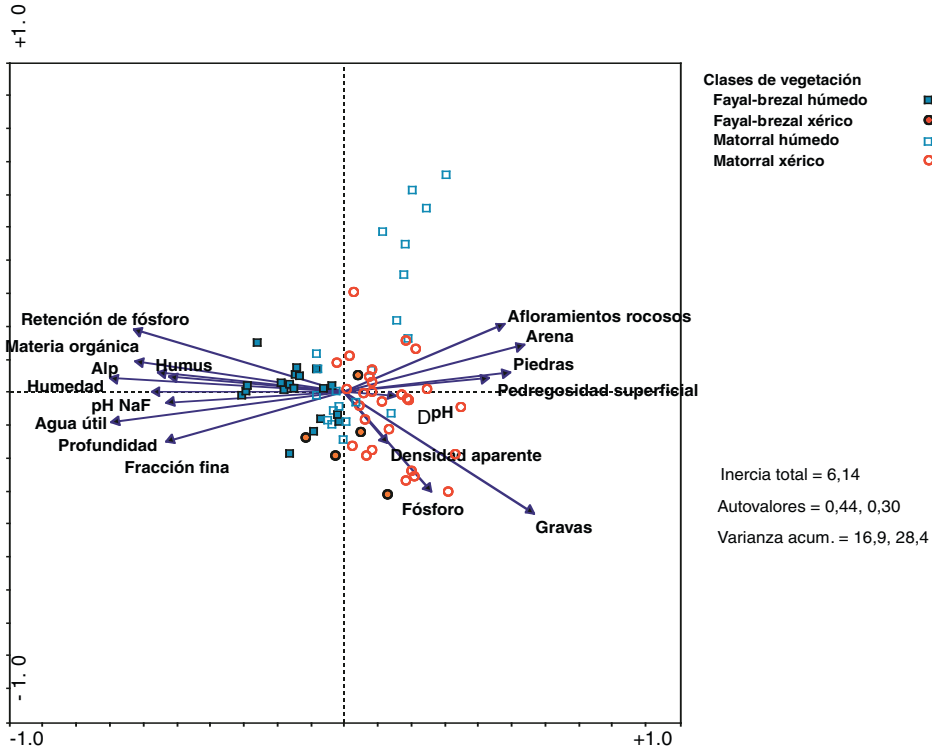


FIGURA 2.-Análisis de suelos y vegetación mediante CCA

Valores del CCA: Inercia total: 6,137; Autovalores: 0,438, 0,301; Varianza acumulativa (%): 16,9;28,4

TABLA 1.- Propiedades edáficas que muestran diferencias significativas entre las distintas comunidades vegetales ($p < 0.05$).

	Fayal-brezal húmedo	Fayal-brezal xérico	Matorral húmedo	Matorral xérico
Humedad superf. (%)	18,9 a	12,2 a	12,1 b	9,8 b
Humedad 30cm prof. (%)	25,2 a	18,4 bc	19 b	14 c
Densidad aparente (MgM ⁻³)	0,47 a	0,42 a	0,6 ab	0,63 b
Limo (%)	50,5 a	49,3 ab	43 bc	42,3 c
Fracción fina (%)	67,5 a	61,8 ab	61,5 ab	56,9 b
Arena fina (%)	13,1 a	15,6 ab	15,6 ab	16,6 b
Arena gruesa (%)	20,1 a	22,6 ab	22,9 ab	26,5 b
Arena (%)	33,1 a	38,2 ab	38,5 ab	43,1 b
Retención de agua pF1/3 (%)	53,9 a	50,4 ab	46,6 b	43,9 b
Retención de agua pF15 (%)	34,6 a	31,5 ab	30,6 ab	29 b
Agua útil (%)	19,3 a	18,8 ab	16 b	14,9 b
P- Olsen (mg/kg)	11,6 ab	21,4 a	10,8 b	16,8 a
Materia orgánica total (%)	18,9 a	18 ab	12,7 b	13,6 ab
Materia orgánica humificada (%)	6,5 a	6,7 ab	4,6 b	5 ab
Ácidos húmicos (%)	2,1 a	2,3 ab	1,4 b	1,6 ab
C-Na ₄ P ₂ O ₇ extr. (%)	4,1 a	3,8 ab	2,9 bc	2,7 c
Al -Na ₄ P ₂ O ₇ extr. (mg/kg)	1,05 a	0,77 ab	0,96 b	0,61 b
Fe -Na ₄ P ₂ O ₇ extr. (mg/kg)	0,31 a	0,22 ab	0,28 a	0,17 b
Si -Na ₄ P ₂ O ₇ extr. (mg/kg)	0,28 a	0,18 bc	0,32 ab	0,19 c
pH (NaF, 2')	10,6 a	10,5 ab	10,2 ab	10 b
Retención de fósforo (%)	84 a	80 ab	76 b	72 b
Zn -EDTA (mg/kg)	1,18 a	1,17 a	1,01 b	0,97 a
Co -EDTA (mg/kg)	0,19 a	0,65 ab	1,86 b	1,31 b
B (mg/kg)	1,2 a	1 ab	0,78 b	0,98 ab
Profundidad (cm)	110 a	105 ab	70 bc	65 c
Pedregosidad superficial (%)	4 a	35 bc	8 ab	9 c
Afloramientos rocosos (%)	5 a	15 ab	14 b	9 b
Suelo desnudo (%)	2 a	0 a	8 b	18 ab
Gravas (%)	23 a	34 ab	32 a	45 b
Piedras (%)	23 a	43 b	39 ab	36 b

Los valores seguidos por la misma letra indican ausencia de diferencias significativas entre esos grupos (tests ANOVA/Tukey y Kruskal-Wallis/U de Mann-Whitney, $p \leq 0,05$)

Las formaciones xéricas, en base a su composición florística, presentan diferencias significativas con respecto a las formaciones húmedas en cuanto al estado de humedad del suelo en profundidad, en algunas propiedades ándicas y en la disponibilidad de fósforo. Las comunidades arbóreas se han desarrollado sobre suelos más profundos y menos pedregosos que en el caso del matorral y además tienen valores significativamente más altos de materia orgánica (total y humificada), de metales complejados con la materia orgánica,

de capacidad de retención de agua, de retención de fosfato y de fracción fina.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los datos analíticos señalan que la regeneración de la vegetación natural en estas áreas degradadas, viene determinada en primer lugar por el edafoclima y los suelos asociados a cada comunidad. Las formaciones arbóreas y de matorral, con una composición florística de tipo húmedo, aparecen en las

zonas más umbrías con un edafoclima údico y colonizando suelos ándicos (Andosoles), mientras que las formaciones más xéricas, tanto boscosas como de matorral, están asociadas a zonas más térmicas con un edafoclima también údico pero de tendencia ústico y sobre Cambisoles y Umbrisoles.

El mayor o menor grado de regeneración de la vegetación, parece estar relacionada con la variación de algunas de las características edáficas más directamente relacionadas con la calidad del suelo. Así, en la actualidad los matorrales se desarrollan sobre suelos poco profundos, pedregosos, arenosos y con un cierto grado de compactación, mientras que las formaciones arbóreas lo hacen preferentemente en los suelos más profundos, con un menor contenido de elementos gruesos y una mayor proporción de las fracciones texturales más finas.

Los datos analíticos indican también que la regeneración de la vegetación arbórea, está

asociada a una mejora notable de la calidad del suelo mediante un proceso de **andosolización**:

a) Incremento significativo del contenido de materia orgánica total y humificada y ácidos húmicos.

b) Incremento de la porosidad, de la capacidad de retención de agua y del grado de desarrollo de la estructura.

c) Aumento progresivo de la capacidad de retención de fósforo y de la formación de complejos organometálicos.

Por el contrario, las formaciones de matorral de degradación o aquellas con un bajo grado de regeneración se asocian a suelos de baja calidad, dominados por procesos de **leptosolización** (en zonas de topografía abrupta) o suelos degradados por erosión, compactación u otros procesos de degradación de la estructura, favorecidos por las características, escasamente protectoras, de la vegetación (Figura 3).

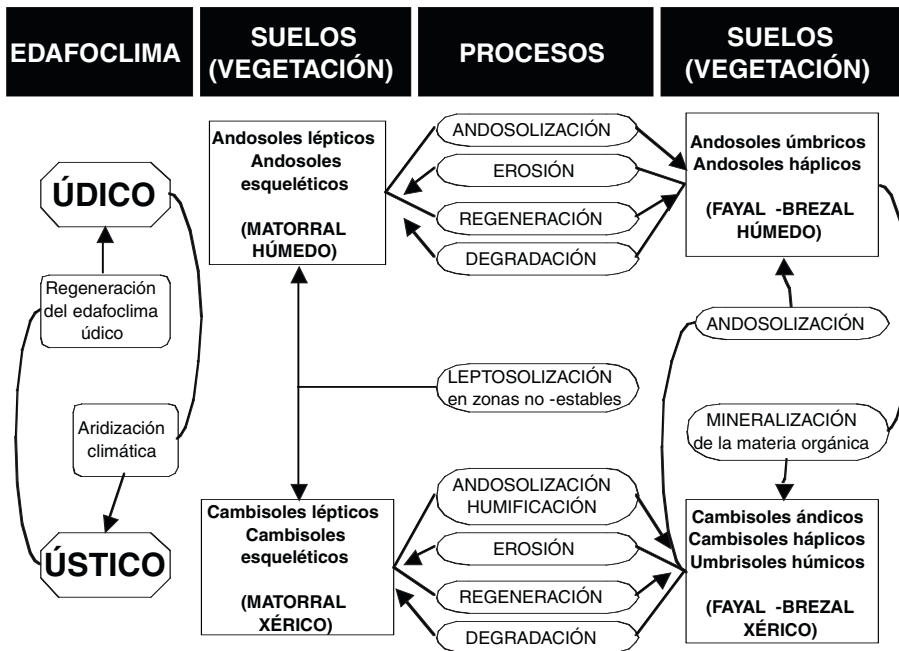


FIGURA 3.- Procesos genéticos en los suelos del área estudiada

Los procesos genéticos señalados, dan lugar en la actualidad a suelos de diferente tipología y por lo tanto con distintos valores en los parámetros indicadores de la calidad del suelo (Tabla 2). Los suelos con características más favorables son los Andosoles úmbricos y háplicos bajo fayal-breza húme-

do y los Cambisoles ándicos y háplicos y Umbrisoles húmicos con fayal-breza xérico. Los matorrales están siempre asociados a Andosoles lépticos y Cambisoles lépticos y esqueléticos de muy baja calidad natural o afectados por severos procesos de degradación.

TABLA 2.- Valores medios de algunas propiedades diagnóstico de los suelos

	Fayal-breza húmedo	Fayal-breza xérico	Matorral húmedo	Matorral xérico
Densidad aparente (g/cm ³)	0.47 ± 0.16	0.42 ± 0.13	0.60 ± 0.19	0.63 ± 0.15
Arcilla (%)	16.4 ± 5.6	12.5 ± 2.1	18.6 ± 9.9	14.5 ± 6.1
Alox+1/2 Feox (%)	2.2 ± 0.7	1.8 ± 0.5	2.0 ± 1.5	1.8 ± 1.1
Retención de fósforo (%)	84 ± 12	80 ± 12	76 ± 16	72 ± 15
Carbono orgánico (%)	11.0 ± 4.8	10.4 ± 1.8	7.4 ± 4.9	7.9 ± 3.7
Índice melánico	1.88 ± 0.10	1.85 ± 0.08	1.96 ± 0.16	1.89 ± 0.12
Elementos gruesos (%)	Abundantes (35-60%)	Muy abundantes (>60%)	Abundantes (35-60%)	Muy abundantes (>60%)
Profundidad (cm)	110	105	70	65
Estructura	Poliédrica	Migajosa	Poliédrica	Poliédrica
Dureza	Blando	Blando	Blando	Blando
Brillo color Munsell	2.9	3.4	3.5	3.9
Croma color Munsell	2.5	2.4	3.3	3.5

Los Andosoles húmicos y háplicos bajo fayal-breza húmedo constituyen los suelos y ecosistemas más maduros y evolucionados de la zona estudiada. Por lo tanto es de especial interés el promover medidas de restauración de la cubierta vegetal arbórea en las áreas colonizadas actualmente por el matorral degradado, para controlar la erosión hídrica, contribuir a restaurar el edafoclima údico y facilitar el proceso de andosolización, con objeto de favorecer una rápida evolución del ecosistema, dejando el matorral sobre Cambisoles y Andosoles lepti-esqueléticos en aquellas áreas donde la leptosolización es el proceso edafogenético dominante y donde carece de interés forzar la regeneración del ecosistema más allá de su estado actual.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el marco del Contrato de Investigación "Plan Complementario Edafológico del Programa de Seguimiento Ecológico en el Parque Nacional de Garajonay" entre el Ministerio de Medio Ambiente (Organismo Autónomo Parques Nacionales) y la Universidad de La Laguna.

REFERENCIAS

Arco, M.J. del., Pérez de Paz, P.L., Wildpret, W., Lucía, V., Salas, M. (1990). Atlas cartográfico de los pinares canarios. La Gomera y El Hierro. Consejería de

- Política Territorial, Gobierno de Canarias, S/C de Tenerife, 90 p.
- Arozena, M.E. (1990). Los paisajes naturales de la Isla de La Gomera. Universidad de La Laguna, Secretariado de Publicaciones, 56 p.
- Doran, J.W. and Parkin, T.B. (1996). Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. En: *Methods for assessing soil quality*, J.W. Doran y A.J. Jones (eds.), Soil Science Soc. of Am., Inc., Madison, WI, 25-37.
- Fernández, A.B. (1990). Garajonay: Origen y restauración de las áreas alteradas del Parque. En: *Parque Nacional de Garajonay: Patrimonio Mundial*, P.L. Pérez de Paz (ed), ICONA, Cabildo Insular de La Gomera, 239-253
- Fisher, R.F. and Binkley, D. (2000). Ecology and management of forest soils. John Wiley and Sons, Inc. 3rd Ed., NY, 490 p.
- Hill, M.O. (1979). TWINSPLAN- a FORTRAN program for arranging multivariate data in an ordered two-way table classification of the individuals and attributes. Ithaca, NY, USA, Cornell University.
- Hill, M.O. and Gauch, H.G. (1980). Detrend Correspondence Analysis, an improved ordination technique. *Vegetatio* 42, 47-58
- Jiménez, C.C., Tejedor, M.L., Rodríguez Rodríguez, A. y Fernández-Caldas, E. (1990). Los suelos del Parque Nacional de Garajonay y su entorno. En. Pérez de Paz, P.L. (Ed.): *Parque Nacional de Garajonay: Patrimonio Mundial*, ICONA, Cabildo Insular de La Gomera, 47-55
- Rodríguez Rodríguez, A., Arbelo, C.D., Guerra, J.A. and Mora, J.L. (2001a). Influences of changes in use on the properties of andosols and andic soils. En: *Volcanic Soils. Properties, Processes and Land Use Internat. Workshop*, Ponta Delgada, Azores, Portugal, 114-115.
- Rodríguez Rodríguez, A., Mora, J.L., Arbelo, C.D. (2002a). Variation of soil quality in plant succession of the coastal scrub of Tenerife (Canary Islands, Spain). En: *Man and Soil at the Third Millenium*, J.L. Rubio, R.P.C. Morgan, S. Asins y V. Andreu (eds.): Geoforma Ediciones, Logroño, Spain, Vol. II, 1185-1198.
- Rodríguez Rodríguez, A., Mora, J.L., Guerra, J.A., Arbelo, C.D. and Sánchez, J. (2002b). An ecosystemic Approach to Soil Quality Assessment. En: *Sustainable Use and Management of Soils in Arid and Semiarid Regions*, A. Faz, R. Ortiz y A.R. Mermut (eds.), Quaderna Ed., Cartagena, Murcia (España), Vol. I, p. 193-208
- Schoenholtz, S.H., Van Miegroet, H. and Burger, J.A. (2000). A review of chemical and physical properties as indicators of forest quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management* 138, 335-356
- Ter Braak, C.J. (1986). Canonical Correspondence Analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology* 67, 1167-1179

PERFIL SALINO-SODICO DE UN MOLLISOL REGADO CON AGUAS SUBTERRÁNEAS Y RESIDUALES NO DEPURADAS EN LA CUENCA DEL LAGO DE VALENCIA, VENEZUELA

F. J. MÉNDEZ

UCV. FAGRO. Instituto de Ingeniería agrícola. Maracay. Venezuela. franky@cantv.net

Resumen. Se estudió el contenido de sales y sodio en dos parcelas experimentales (MOLLIC USTIFLUVENTICS, FRANCOSEA CARBONATICA MIXTA ISOHIPERTERMICA) cultivadas con caña de azúcar. La primera parcela (T1) fue regada durante más de 10 años con aguas residuales no depuradas (R1) y la segunda (T2) con aguas subterráneas (S1). Durante el periodo de estudio (julio de 1997 a junio de 1998) se analizaron 200 muestras de suelo procedentes de cada parcela, 4 puntos de muestreo por parcela y cinco profundidades. Las fuentes de agua usadas para riego presentaron valores medios de EC_r de 2,1 $dS\ m^{-1}$ y 3,0 $dS\ m^{-1}$ y de RAS° de 10,8 y 6,9, respectivamente. Los suelos de ambas parcelas presentaron valores medios de EC_e de 1,0 $dS\ m^{-1}$ y 2,0 $dS\ m^{-1}$, de PSI de 5,9 y 2,3 y de RAS de 5,1 y 2,4, respectivamente. Los suelos de ambas parcelas no manifestaron en el tiempo de estudio riesgos por salinización ni sodificación en el perfil del suelo considerado. El análisis estadístico manifestó diferencias significativas de la EC_e y la RAS entre los dos tratamientos (T1 y T2), siendo significativa la interacción tratamiento x profundidad sólo para la EC_e . En ningún caso los rendimientos de ambas parcelas se ha visto afectado, al contrario, la producción de 175 $t\ ha^{-1}$ y 162 $t\ ha^{-1}$ obtenidas en T1 y T2 respectivamente, superan los rendimientos medios para la zona.

Palabras clave: Salinidad, sodicidad, aguas residuales, Lago de Valencia, caña de azúcar.

Abstract. The salts and sodium contents in two experimental plots (MOLLIC USTIFLUVENTICS, FRANCOSEA CARBONATICA MIXTA ISOHIPERTERMICA) cultivated with sugar cane were studied. The first plot (T1) was irrigated for more than 10 years with non-treated wastewaters (R1) and the second plot (T2) with groundwater (S1). During the study period (from July 1997 to June 1998) 200 soil samples were taken by means of a systematic soil survey in each experimental plot, corresponding to 4 sampling points and 5 depths. The two irrigation water sources showed average values of EC_r of 2,1 $dS\ m^{-1}$ and 3,0 $dS\ m^{-1}$, and SAR° of 10,8 and 6,9, respectively. The soils of the experimental plots showed average values of EC_e of 1,0 $dS\ m^{-1}$ and 2,0 $dS\ m^{-1}$, ESP of 5,9 and 2,3; and SAR of 5,1 and 2,4, respectively. Neither study soil showed risks of salinization and sodification during the research period. Statistical analysis showed significant differences in EC_e and SAR between the two treatments (T1 and T2), and the interaction factor treatment x depth was only significant for EC_e . Crop yields of the two plots (T1 and T2) were not affected, moreover the yields obtained (175 $t\ ha^{-1}$ and 162 $t\ ha^{-1}$, respectively) were greater than average yields of the region.

Key words: salinity, sodicity, wastewaters, Valencia Lake, sugar cane.

INTRODUCCION

Las características físicas, químicas y biológicas de los suelos regados con las aguas residuales no depuradas son de sumo interés, pues influyen en la calidad del agua que percola a través del perfil del suelo y la posible contaminación de las aguas subterráneas (Méndez, 1998). El concepto de calidad del agua se refiere a las características que pueden afectar su adecuación a un uso específico, es decir, a la relación entre la calidad del agua y las necesidades del usuario (Ayers y Westcot, 1985). Es notorio destacar que en el ámbito internacional se sigue investigando sobre el uso de las aguas residuales para riego, incluso desde el siglo pasado. La reutilización de las aguas residuales para riego, bien sea con tratamientos previos o no, pasa a tener, dentro del ámbito científico y tecnológico, un papel de suma importancia (Juwarkar y Subrahmanyam, 1987; Jiménez, 1995; Tanji, 1997). La composición salina del agua de riego y las características del suelo son factores determinantes en la sodicidad de los suelos, ya que aguas con altos contenidos de carbonatos de sodio, carbonatos de calcio y magnesio presentan elevado riesgo de generar sodicidad (Eaton, 1950; Pla y Dappo, 1977; Rhoades, 1992).

Según Dappo (1975) el cultivo de la caña de azúcar comienza a ser afectado por sales en el suelo cuando la CE_e sobrepasa los 6 dS m^{-1} . Contrariamente Maas y Hoffman (1977) señalan que la caña de azúcar puede soportar CE_e de 1,7 dS m^{-1} (salinidad umbral), pero a partir de allí declina su rendimiento en un 5,9 % por cada unidad de incremento de la conductividad eléctrica. Méndez (1998) indica que las propuestas anteriores reflejan hoy por hoy una realidad de ámbito muy general y sirven únicamente de guía, ya que los avances en tecnologías científicas, como la mejora genética y prácticas agrícolas certificadas, hacen que sea posible conseguir mejores rendimientos aun con CE_e más altas a las propuestas por

Dappo (1975) y Mass y Hoffman (1977). En este sentido, el presente trabajo tiene como objetivo determinar si las aguas residuales no depuradas de un sector de la ciudad de Guacara, utilizadas para riego durante más de una década, han salinizado o sodificado el perfil de los suelos e influido en el rendimiento del cultivo de la caña de azúcar.

MATERIAL Y METODOS

La Cuenca del Lago de Valencia forma parte de los estados Aragua y Carabobo. Esta cuenca posee la particularidad de ser endorréica, es decir no posee salida natural de sus aguas, el Lago de Valencia (10°05' a 10°16' Norte y 67°35' a 67°52' oeste) constituye su cuerpo de agua receptor final (altitud 408 msnm). La cuenca posee una superficie de 3140 km² de los cuales el 53% son áreas planas, 35% áreas montañosas y 12% de superficie de agua (Lago de Valencia 350 Km² y embalses Zuata y Tagüaigüay 12 Km²). El clima de la cuenca, tropical húmedo, está caracterizado por la alternancia de una estación seca (noviembre - abril) y de una estación húmeda (mayo - octubre). Las precipitaciones anuales varían de 800 mm en los alrededores del Lago hasta 1800 mm en la cadena montañosa costera. La temperatura es relativamente uniforme, con una media anual de 24,6 °C. La evaporación media anual es de 2200 mm. Los suelos dominantes pertenecen a los órdenes de Entisoles y Mollisoles, donde se desarrollan cultivos de caña de azúcar, bananos, maíz y hortalizas.

En el sector Las Palmeras (Fig.1) se seleccionaron dos parcelas experimentales cultivadas con caña de azúcar y con las siguientes características: T1, regada durante más de 10 años con aguas residuales (R1) procedentes de un colector de drenaje de aguas residuales urbanas e industriales de la ciudad de Guacara, pendiente del 0,1% en el sentido del riego, área 2,4 ha, rendimiento medio de 175 t.ha⁻¹ y T2, regada con aguas

subterráneas (S1) de un pozo profundo ubicado en la parcela, pendiente del 0,1% en el sentido del riego, área de 2,8 ha, rendimiento medio de 162 t.ha⁻¹. En cada parcela se tomaron 200 muestras de suelo correspondientes a cuatro puntos de muestreo, cinco profundidades (cada 20 cm) y 10 muestreos realizados desde Julio de 1997 hasta Junio de 1998. En los suelos se determinó: conductividad hidráulica, mediante el empleo de un permeámetro de carga constante; análisis granulométrico, según el método de Boyoucos; la salinidad, mediante la determinación de la conductividad eléctrica en el extracto de saturación (CE_e) corregida a 25°C (USDA, 1954); porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y la relación de adsorción de sodio (RAS), calculado a partir de las ecuaciones propuestas por

USDA (1954); la CIC y bases intercambiables, según Pla (1969); pH en una relación suelo:agua de 1:2,5; carbono orgánico, determinado por la versión modificada del procedimiento de Walkey-Black (Jackson, 1970). En las aguas se determinó, la conductividad eléctrica corregida a 25 °C (CE_r) y la Relación de Adsorción de sodio corregida (RAS^o) por cálculo según Suárez (1981); el sodio se determinó por fotometría de llama y el calcio y la dureza total mediante valoración con EDTA. Se realizó un análisis de varianza para cada muestreo en el tiempo empleando el programa BMDP4M (1983) y considerando como factores el tratamiento (T1 y T2), la profundidad de muestreo y la interacción entre ambos.

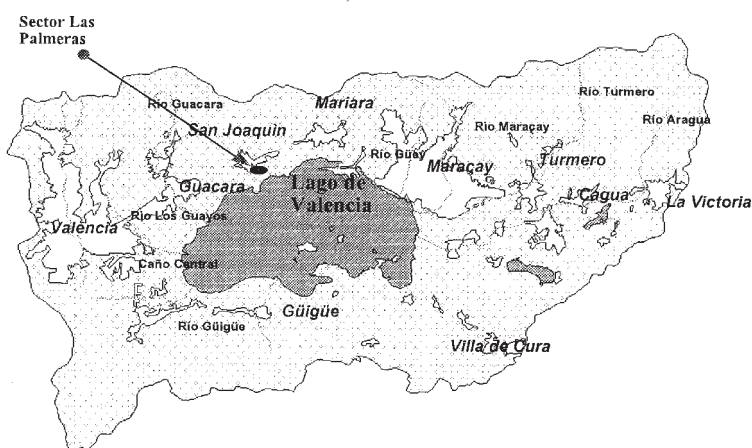


FIGURA 1. Ubicación del área experimental (Sector Las Palmeras) en la cuenca del Lago de Valencia

RESULTADOS Y DISCUSION

El suelo característico de las parcelas experimentales se clasifica como Mollic Ustifluventics, francosa Carbonática Mixta Isohipertérmica (USDA, 1999). Las características físicas y químicas (Tabla 1) reflejan una elevada CIC, contenidos de materia orgá-

nica de medianos a bajos (Brito et al, 1990), pH entre ligeramente alcalino y alcalino, complejo de cambio saturado en bases, texturas ligeras, baja densidad aparente y elevado incremento de la conductividad hidráulica con la profundidad del suelo. Estas características le confieren a ambas parcelas propiedades no restrictivas para la producción sos-

tenida del cultivo de la caña de azúcar mediante el riego con aguas residuales (Méndez, 1998).

La salinidad de las dos fuentes de agua R1 y S1 presentan valores medios de 2,1 dSm⁻¹ y 3,0 dS m⁻¹, respectivamente, y

aumenta ligeramente con el tiempo (Fig.2); su uso como aguas de riego puede inducir, por tanto, ligero a moderado riesgo de salinización del suelo (Ayers y Westcot, 1985; Rhoades, 1992).

TABLA 1. Características físicas y químicas (valores medios) de los suelos de las parcelas experimentales (T1 y T2).

Parcela experimental	Profundidad (cm)	Cationes intercambiables (cmol kg ⁻¹)				PSB	Materia orgánica (%)	N (%)	P (mg k ⁻¹)	pH en agua 1:2,5	Espacio Poroso (%)	Densidad Aparente (g c ⁻³)	Conductividad Hidráulica cm h ⁻¹	textura	Nivel freático en m	
		CIC (cmol kg ⁻¹)	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺											K ⁺
T1	0-20	38,3	34,4	2,7	0,93	0,27	100	2,70	0,55	25	7,89	34,6	1,03	2,03	F	5
	20-40	37,4	33,9	2,4	0,96	0,14	100	0,70	0,28	16	8,40	34,3	1,00	10,70	Fa	
	40-60	46,6	42,9	2,3	1,30	0,10	100	0,45	0,17	21	8,80	45,2	0,78	30,80	Fa	
	60-80	74,0	70,5	2,3	1,10	0,10	100	0,23	0,16	21	9,00	40,9	0,88	39,10	Fa	
	80-100	76,9	73,9	2,1	0,86	0,04	100	0,40	0,10	15	9,00	54,3	0,56	37,10	Fa	
T2	0-20	38,3	34,4	2,7	1,10	0,1	100	0,60	0,11	32	8,34	32,6	1,04	1,79	Fa	5
	20-40	37,4	33,9	2,2	1,22	0,08	100	0,90	0,14	23	8,31	50,0	0,62	3,62	Fa	
	40-60	48,6	44,8	2,0	1,7	0,1	100	0,31	0,08	23	8,23	50,0	0,56	8,10	aF	
	60-80	74,0	70,5	2,0	1,42	0,08	100	0,25	0,02	21	7,85	48,9	0,59	14,9	aF	
	80-100	76,9	73,7	1,8	1,33	0,07	100	0,10	0,04	23	7,84	50,0	0,59	14,8	aF	

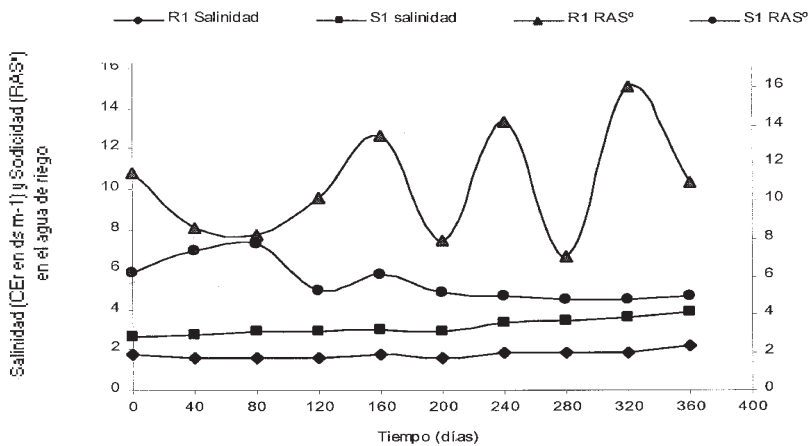


FIGURA 2. Evolución temporal de la salinidad (CER) y de la sodicidad (RASr) en las fuentes de agua usadas para riego (R1 y S1).

La sodicidad, manifestada por la RAS° , oscila entre 7,2 y 16,0 para R1 y entre 4,9 y 7,3 para S1 con variaciones temporales diferentes según la fuente de agua. En R1 hay una variación errática a lo largo del tiempo, atribuible a los vertidos industriales de una empresa papelera que emplea hiposulfito de sodio en su proceso industrial y, con un aporte de más del 50 % del volumen total de aguas que drenan al colector de aguas residuales. El uso de estas fuentes de agua para riego no debe generar en el suelo problemas de infiltración de agua como consecuencia de la dispersión que pueda generar el ion sodio en los suelos según Ayers y Wescot (1985); es decir, no hay riesgos potenciales de sodificación en ninguna de las parcelas experimentales. Sin embargo, de acuerdo a las características hidrogeológicas de los suelos evaluados y con un nivel freático sobre los 5 m de profundidad, es muy probable que las aguas residuales alcancen las aguas freáticas muy rápidamente.

La salinidad en el suelo representada por la CE_e (Fig 3), presentó en T1 ligeras variaciones en el tiempo y tendencia a disminuir con la profundidad hasta alcanzar valores medios de 0,65 dS m^{-1} . En T2 presentó un comportamiento ascendente en el tiempo, excepto a los 200 días de iniciada la evaluación donde se interrumpe este comportamiento, para posteriormente continuar su ritmo ascendente. Así mismo, la salinidad en T2 presenta un notable incremento con la profundidad del perfil del suelo evaluado. De acuerdo a lo propuesto por Dappo (1975) la salinidad en T1 y T2, con valores medios de 1,0 dS m^{-1} y 2,0 dS m^{-1} , respectivamente, en todo el perfil del suelo, no representa riesgo de disminución de los rendimientos relativos. Sin embargo, según Mass y Hoffman (1977), en T2 debió de presentarse una disminución del rendimiento relativo de al menos 5,9 %, lo que no se evidenció en los rendimientos de ninguna de las dos parcelas experimentales, que, en todo caso, manifestaron durante ese

ciclo de producción los rendimientos medios más elevados de la zona, con 175 t ha^{-1} y 162 t ha^{-1} , respectivamente. Por tanto, las propuestas de Dappo (1975) y Mass y Hoffman (1977) deben ser consideradas únicamente como una guía y no como una propuesta de resultado definitiva (Méndez, 1998).

A partir de la Relación de adsorción de sodio en el extracto de saturación (RAS_e), que representa el comportamiento del ion sodio en la matriz del suelo, se puede apreciar (Fig.4) que la sodicidad en las dos parcelas experimentales presenta un comportamiento definido por las fuentes de agua empleadas para riego, es decir, los suelos T1 regados con las aguas R1 de mayores valores de RAS_r , presentan los mayores valores de RAS_e , aunque no se aprecie para un comportamiento definido en el tiempo. Los valores medios de la RAS_e en el tiempo y en la profundidad, con 5,1 y 2,4 en T1 y T2, respectivamente, no representan un riesgo de sodificación del suelo (Rhoades, 1992; Pizarro, 1990; Ayers y Westcot, 1985; USDA, 1954). Igualmente, el uso del Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI) como un indicador de riesgos de sodificación en el suelo (Pizarro, 1985) nos permite señalar la ausencia de riesgos en las dos parcelas experimentales, ya que los valores medios de PSI obtenidos han sido de 5,9 y 2,3 para T1 y T2, respectivamente.

El análisis de varianza para la salinidad (Tabla 2) reportó diferencias significativas al 5% entre tratamientos y entre la interacción tratamiento X profundidad, es decir, la salinidad se comporta de manera diferente dependiendo de la fuente de agua empleada para riego y en la profundidad del suelo para cada parcela experimental.

El análisis de varianza para la sodicidad (Tabla 3) mostró diferencias significativas al 5% entre tratamientos, es decir, la sodicidad se comporta de manera diferente dependiendo de las fuentes de agua usadas para riego en cada parcela experimental. La interacción tratamiento X profundidad no manifestó ningun-

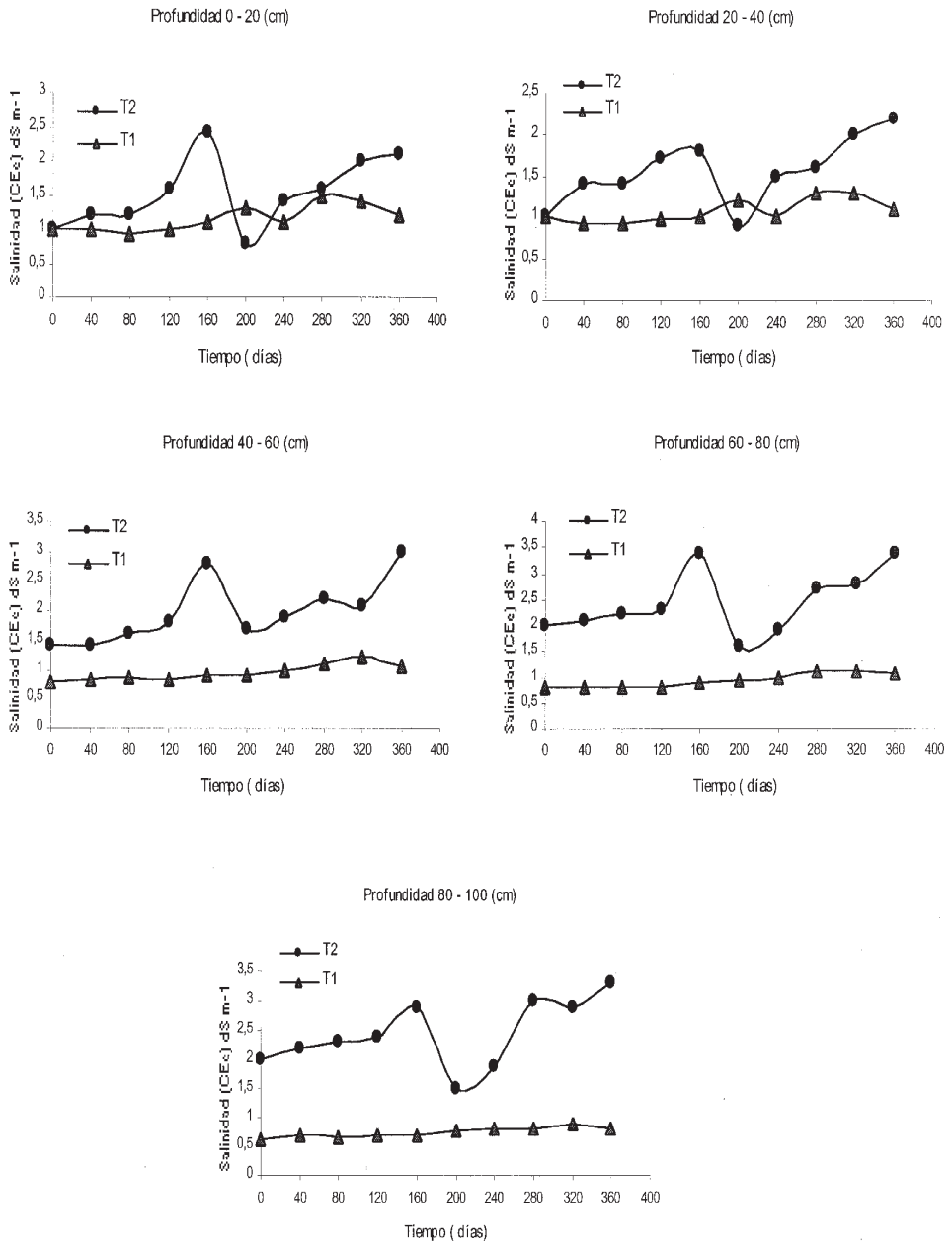


FIGURA 3. Evolución temporal de la salinidad del suelo (CEe dS m^{-1}) en cada profundidad para los dos tratamientos evaluados (T1 y T2).

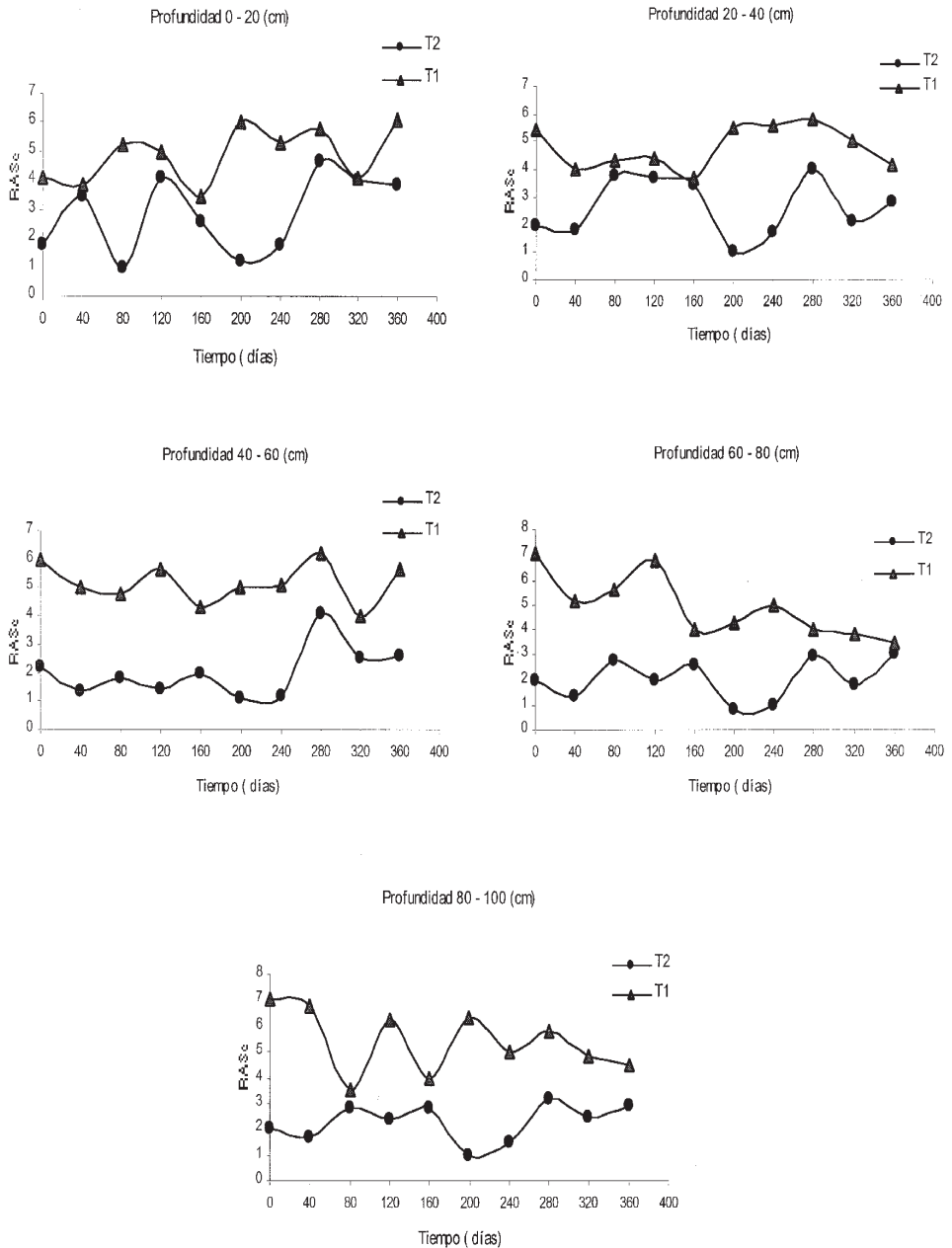


Figura 4. Evolución temporal de la Relación de Adsorción de sodio (RASe) en cada profundidad para los dos tratamientos evaluados (T1 y T2)

TABLA 2. Análisis de varianza de la salinidad del suelo (CEe en dS m⁻¹) para cada tiempo y fuente de variación.

Fuente de Variación (FV)	Tiempo (días)									
	0	40	80	120	160	200	240	280	320	360
Tratamiento	49.3*	111.8*	47.6*	148.5*	247.3*	24.6*	5.0*	41.4*	4.7*	129.3*
Profundidad	2.3	2.4	1.40	2.1	2.3	2.1	0.4	2.3	1.3	2.2
Trat. X Prof.	8.9*	10.1*	4.3*	4.2*	5.5*	18.9*	3.6*	4.1*	3.8*	3.5*

* Valores de F (P < 0,05)

TABLA 3. Análisis de varianza de la RASE para cada tiempo y fuente de variación.

Fuente de Variación (FV)	Tiempo (días)									
	0	40	80	120	160	200	240	280	320	360
Tratamiento	180.2*	24.6*	40.1*	25.73*	15.63*	73.68*	62.53*	7.57*	13.96*	4.95*
Profundidad	1.77	1.36	1.32	0.40	0.41	0.73	0.70	1.08	0.65	1.29
Trat. X Prof.	2.08	2.67	2.76	2.16	0.29	0.57	0.11	0.11	1.88	0.93

* Valores de F (P < 0,05)

na significación, es decir, la sodicidad no expresa contrastes significativos al considerar ambas fuentes de agua usadas para riego y su impacto en la profundidad del suelo en las parcelas experimentales.

Considerando una profundidad de enraizamiento efectiva para la caña de azúcar de 60 cm (Maica, 1997) y los valores de la CE_e obtenidos, se puede decir que no existe riesgo de disminución del rendimiento potencial de este cultivo (Maas y Hoffman, 1977; y Ayers y Westcot, 1985; Rhoades et al, 1992). Estos últimos definen al cultivo de la caña de azúcar como un cultivo de moderado a tolerante a los efectos de la salinidad.

CONCLUSIONES

Desde el punto de vista de producción vegetal y al riesgo de salinización y sodificación del suelo, se puede decir que las aguas residuales no depuradas con características

similares en este trabajo, pueden ser utilizadas en suelos similares a los aquí presentados, lo que representa una alternativa de gestión de este tipo de aguas. Sin embargo, de mantenerse este sistema de producción sería necesario una adecuada planificación para la evaluación permanente de la calidad de los suelos y de las aguas subterráneas ya que, además de los aspectos aquí considerados se deberá tener en cuenta el contenido de metales pesados presentes en aguas de riego, aguas subterráneas, suelos y la carga biológica contaminante presente en las aguas residuales.

REFERENCIAS

Ayers, R y Westcot, D. (1985): La calidad del agua en la agricultura. Estudio F.A.O. Serie Riego y drenaje N° 29. Italia. 174 p.

- BMDP4M (1983): Statistical software. Printing with additions. University of California Press.
- Brito, J., Rojas, I., Roberti, R. (1990): Análisis de suelos para diagnóstico de fertilidad. Manual de métodos y procedimientos. FONAIAP-CENIAP-MARACAY. 164 p.
- Dappo, Q.F. (1975): La salinidad y su influencia en la agricultura. FUDECO. Barquisimeto. Venezuela. 18 p.
- Eaton, F. (1950): Significance of carbonates in irrigation waters. *Soil Sci* 69,123-133.
- Jackson, M.(1970): Soil Chemistry Analysis. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NY. 662 p.
- Jiménez, C.B. (1995): Wastewater reuse to increase Soil productivity. *Wat. Sci. Tech.* 52, 173-180.
- Juwarkar, S. y Subrahmanyam P. (1987): Impact of pulp and paper mill wastewater on crop and soil. *Wat. Sci. Tech.* 19, 693-700.
- Maas, E. and Hoffmann, G. (1977): Crop Salt Tolerance- current assessment. *A.S.C.E.* 103, 115-134.
- Maica, R. (1997): Aspectos agronómicos de la caña de azúcar (ciclo soca) relacionados con el régimen hídrico al emplear tres niveles de agotamiento de la humedad en el suelo. Tesis de Grado. Ingeniero Agrónomo. UCV. Facultad de Agronomía. 71 p
- Méndez, F. (1998): Contribución al estudio sobre el uso de aguas residuales con fines de riego. Trabajo de ascenso. UCV. Facultad de Agronomía. 128 p
- Pizarro, F. (1985): Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Editorial Agrícola Española. Segunda Edición. Madrid, España. 942 p.
- Pizarro, F. (1990): Riego localizado de alta frecuencia. Ediciones mundi-Prensa. Segunda edición. Madrid, España. 471 p.
- Pla, I. (1969): Metodología de laboratorio recomendada para el diagnóstico de salinidad y alcalinidad en suelos, aguas y plantas. U.C.V. Facultad de Agronomía. Maracay 117 p.
- Pla, I. y Dappo, F. (1977): Field-testing of a new system for qualifying irrigation water. Proc. Int. Conf. on managing saline water for irrigation. Texas Tech. Univ. Lubbock Texas, USA. 376-387.
- Rhoades, J. (1992): The use of saline water for crop production. F.A.O. Irrigation and Drainage paper N° 48. Rome, Italy, 133 p.
- Suarez, D. (1981): Relation between pHc and sodium adsorption ratio (SAR) and an alternate method of estimating SAR of soil or drainage waters. *Soil Sci. Amer. J.* 45, 469-475.
- Tanji, K. (1997): Irrigation with marginal quality waters: *A.S.C.E.* 123, 165-168.
- USDA (1954): Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. United State Department of Agriculture. Soil Survey Staff.Agriculture Handbook, 60. 170 p.
- USDA (1999): Soil Taxonomy. A Basic of Soil Soil Classification For Making and Interpreting Soil Surveys. United State Department of Agriculture. Soil Survey Staff. Agriculture handbook, 436. 869 p.
- Walkey, A. y Black, J. (1974) A critical examination of rapid method for determining organic carbon in soil. *J. Soil. Sci.* 63,254-254.

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL CICLO DEL AGUA EN SUELOS FORESTALES CON *Pinus radiata* DE GALICIA (NO DE ESPAÑA)

R. CALVO DE ANTA, M.X. GÓMEZ REY

Dpto. de Edafología e Química Agrícola. Fac. de Biología, Univ. de Santiago de Compostela. 15782-Santiago de Compostela. Email: edchus@usc.es y edrcda@usc.es

Abstract. From 1997 to 1999 rainfall, infiltration and drainage waters were collected in three plots with *Pinus radiata* cover, located in NW Spain and having similar climate and site (physiography, plantation frame, age and height of the trees, etc...) conditions. Sampling followed natural rainfall sequences, and throughfall data was obtained at different locations with the aim to establish the spatial variability of water inputs to the forest system.

The results show the important role played by some tree species, particularly when the height of the trees is larger than 20 m, in areas with high annual precipitation (>1500 mm). Under these conditions concentric microsystems of soil development are generated, with intensities of effective fluxes ranging from 1000 to 15000 L m⁻² y⁻¹ increasing from the edge of the area covered by the crown to the tree trunk. In comparison with unforested soils, the systems described here are subject to highly heterogeneous spatial and temporal evolution rhythms, which alter the distribution pattern depending on felling rotations and thus on the actual location of the trees each new generation. The influence of these tree species on soil evolution is expected to increase considerably in the presence of atmospheric pollutants, taking into account the concentrating effect of the solutions derived from the leaching of intercepted rainfall.

Key words: water cycle, forest soils

Resumen. Durante dos años completos (1997-1999) se recogieron las aguas de precipitación, infiltración bajo cubiertas y drenaje en tres parcelas forestales con *Pinus radiata* de Galicia con similares condiciones de clima y estación. El muestreo se realizó según secuencias naturales de lluvia, obteniéndose datos de pluviolavado en diferentes puntos a fin de establecer la variabilidad espacial de las entradas de agua al sistema.

Los resultados ponen de manifiesto el importante papel que puede ejercer esta especie, cuando alcanza portes superiores a 20 m, en suelos de ambientes con intensa pluviosidad anual (>1500 mm/año), generándose microsistemas de evolución concéntrica, con intensidades de flujo efectivo que pueden variar entre 1000 y 15000 l/m²/año, desde los extremos de las copas a las zonas más próximas a los troncos. En comparación con los suelos no arbolados, estos sistemas están sujetos a ritmos de evolución fuertemente heterogéneos tanto espacial como temporalmente, produciéndose alteraciones de esta distribución según los turnos de corta y, por lo tanto, de la disposición en el terreno de cada nueva generación. En presencia de contaminantes atmosféricos, es de prever que la influencia de estas especies forestales sobre el suelo se incremente de forma considerable, teniendo en cuenta el efecto concentrador de las disoluciones de entrada derivado del lavado de la interceptación.

Palabras clave: Balance hídrico, suelos forestales

INTRODUCCIÓN

En regiones de elevada pluviosidad los flujos de entrada y salida de agua al suelo resultan determinantes en el mantenimiento de la calidad de los sistemas, tanto por regir la intensidad de la evolución geoquímica del medio edáfico, como por influir decisivamente en el control de las propiedades de las aguas superficiales, en función del tiempo de residencia y consecución o no del equilibrio con los suelos.

La influencia de diferentes especies forestales sobre el ciclo hidrológico y, por lo tanto, sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos, ha sido puesta de manifiesto en numerosos estudios (Zinke, 1962; Gesper y Holowaychuk, 1971; Aussenac y Granieer, 1988; Falkengren-Grerup, 1989; Whitehead y Kelliher, 1991; Fahey, 1994...). La mayor parte de los trabajos suministran datos medios de las entradas y salidas anuales de agua en los sistemas, poniendo de manifiesto no sólo la importancia de la especie, sino su edad, altura, marco de plantación... así como la variabilidad dependiente del tipo de ambiente climático (intensidad y distribución de la pluviosidad, velocidad del viento...etc.). En muchos casos se hace referencia al efecto concentrador del tronco, sobre todo en especies con un determinado ángulo de proyección de las ramas sobre el fuste, efecto que es tanto más importante cuanto más intensos y continuos resulten los chubascos (Rutter, 1962; Mahendrappa, 1989; Domingo et al., 1998; Huber y Oyarzun, 1990, 1992...).

En Galicia, una región de elevada e intensa pluviosidad (>1500 mm/año, con más de un 80% en el período Octubre-Mayo), la superficie total de suelo con uso forestal es superior a 1.000.000 ha, cerca de 1/3 del territorio, siendo las coníferas las principales plantaciones (un 30% de la superficie arbolada como masas puras y un 50% como plantaciones mixtas, 2º Inventario Forestal). La extensión ocupada por plantaciones de *Pinus*

radiata, en masas puras, es próxima a 100.000 ha. En la actualidad se dispone de algunos datos de parámetros hídricos en suelos forestales, tanto en bosques de coníferas como de frondosas (Calvo de Anta et al., 1979, 1992; Paz González y Díaz-Fierros, 1985) y se han realizado balances hídricos de cuencas (Gras, 1993; Fernández-Vega, 1998; Dambrine et al., 2000). El objetivo de este estudio es mejorar la cuantificación del ciclo del agua en sistemas con *P. radiata* utilizando un método de seguimiento en continuo, durante dos años completos (1997-1999) y en tres parcelas de similares características situadas en diferentes puntos del territorio. Junto a los balances *input/output* medios se pretende establecer la variabilidad espacial existente en los suelos forestados.

MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio se ha realizado en tres parcelas forestales del centro-oeste y norte de Galicia en zonas de monte a 500-600 m de altitud, con condiciones similares del terreno y características estructurales de la plantación (Tabla 1). El régimen de temperatura es *mésico* (con un valor medio en torno a 12°C) y el régimen de humedad *údico*, con registros medios de precipitación entre 1300 y 1800 mm/año.

Para la caracterización de las entradas de agua se han realizado muestreos con periodicidad semanal (durante el período húmedo) o mensual (durante el seco), cuantificando la precipitación con pluviómetros situados en las proximidades, no forestadas, de las parcelas; para el pluviolavado se dispusieron 18 pluviómetros bajo las copas, en diferentes posiciones; el flujo de tallo se midió sobre 14 árboles representativos de las poblaciones, a cuya corteza se fijaron mangas de recogida abiertas longitudinalmente y dispuestas en espiral desde 1.5 m hasta un colector, situado en la base.

Para la toma de aguas gravitacionales se han utilizado lisímetros de tensión cero con

Tabla 1. Características generales de las parcelas de estudio.

	O Martelo	Goente	Muras
Coordenadas	42°49'42"N 7°58'58"	8°46'18" 43°31'33"N	43°24'55"N 7°38'53"
Altitud	490	520	530
Precipitación media (período)	1770 (1955-97)	1573 (1961-97)	1222 (1970-97)
Tª media (°C)	12.9	11.8	13.5
Edad de la plantación (años)	25-30	25-30	25-30
Nº árboles/ha	625	625	625
Altura media (m)	20	18	15
Perímetro (a 130 cm)	86	78	63
Tipo de suelo (WRB, 1998)	Umbrisol haplico	Umbrisol gleico	Umbrisol haplico
Mat.original	Granito de dos micas	Filitas ordovícicas "ollo de sapo"	Granito de dos micas

forma de cuña, de base rectangular de 38x29 cm, construidos en metacrilato y que fueron introducidos en el suelo, por duplicado, bajo diferentes horizontes: O+Ah₁, a 20 cm de la superficie; O+Ah₁+Ah₂, a unos 40 cm; O+Ah₁+Ah₂+C (Bw en la parcela de Muras), entre 80 y 100 cm, según los casos. Las tuberías de salida se canalizaron hacia un pozo situado a unos 15 m de los lisímetros, en donde se dispusieron los colectores. Una vez introducidos los lisímetros se sellaron las calicatas con los acopios de material de suelo previamente retirado. Dados los desfases temporales observados en los lisímetros a los pocos meses de iniciada la experiencia, así como los indicios de posibles pérdidas de agua por escorrentía subsuperficial..., etc., el cálculo del flujo de agua se realizó a partir del análisis químico de las disoluciones recogidas, aplicando consideraciones iso-cloro. Así mismo, se instalaron lisímetros de relleno estandar (LRE), construidos en material de polipropileno, con paredes de malla de 2 cm de luz y base de 51x38 cm, que se rellenaron con material de suelo del horizonte Ah₁ y Ah₂ y se introdujeron en el hueco desalojado, evi-

tando en lo posible la presencia de zonas de circulación preferencial. Estos lisímetros se utilizaron para obtener otra aproximación a las características del drenaje en los horizontes superficiales de los suelos sin la influencia (no controlable) de las raíces y, dado que se procedió de modo idéntico en las tres parcelas (misma cantidad de suelo, grado de empaquetamiento... etc), obtener datos útiles para establecer mejor las comparaciones de comportamiento entre los diferentes suelos.

Por último, durante 1998 se tomaron, con periodicidad mensual, aguas de salida de los sistemas (arroyos y escorrentía subsuperficial), a las que se aplicaron balances iso-cloro con el fin de ajustar mejor los flujos del suelo en su conjunto.

RESULTADOS

En la Tabla 2 se recogen los valores medios de los resultados obtenidos para los parámetros del balance de copa, precipitación, pluviolavado, flujo de tallo e interceptación, para las tres parcelas, durante los dos años del estudio (Gómez Rey, 2002). De

modo general, el pluviolavado representa alrededor de un 70% de la precipitación, reconociéndose entre ambos parámetros una correlación elevada que permite establecer una ecuación predictiva de las entradas medias a cada suelo forestal (Fig.1) y, por extensión, a los suelos de la región para este tipo de sistema y año climático. Así mismo, el flujo de tallo varió de acuerdo a la precipitación, siendo irrelevante en periodos poco lluviosos y, por el contrario, muy intenso en épocas de fuertes precipitaciones (Fig.2).

Globalmente, la interceptación anual de las cubiertas arbóreas osciló entre 17-27% de la precipitación, resultando los valores más elevados en la parcela con menor pluviosidad y mayor intensidad de viento (Muras). Estos resultados no difieren significativamente de los obtenidos en otros estudios en sistemas con *P. radiata*, en áreas con similar volumen de precipitación (Tabla 3).

No obstante, si bien los valores medios son útiles para realizar una valoración global del ciclo hidrológico en sistemas forestales

Tabla 2. Datos medios de los parámetros de entrada de agua a los sistemas

PR:precipitation; Pl:pluviolavado; FT:flujo de tallo; l/m²(eq):l/m²equivalente; INT: interception

		Martelo		Goente		Muras		datos medios	datos medios (Ma+Go)
		1997	1998	1997	1998	1997	1998		
PR	l/m ²	2315.0	1715.0	2136.7	1785.1	1710.5	1530.5	1865.5	1988.0
Pl	l/m ²	1639.3	1323.7	1621.5	1435.0	739.7	765.2	1254.3	1504.
	(%PR)	(70.8)	(77.2)	(75.9)	(80.4)	(43.2)	(50.5)	(67.2)	(75.7)
FT									
	l/tallo	1518.2	1100.7	3655.9	3069.1	526.6	436.2	1717.8	2336.0
	l/ha	948875	827938	2286269	1918188	329125	272625	1073625	1459984
	l/m ² (eq)	94.9	68.8	228.5	191.8	32.9	27.3	107.4	146.0
	(%PR)	(4.07)	(4.01)	(10.7)	(10.7)	(1.9)	(1.8)	(5.8)	(7.3)
INT	l/m ²	580.1	321.5	286.7	158.3	937.7	738.0	503.8	337.1
	(%PR)	(25.1)	(18.8)	(13.4)	(8.9)	(54.8)	(48.2)	(27.0)	(17.0)

Tabla 3. Algunos datos bibliográficos sobre balances hídricos en sistemas forestales de *Pinus radiata*

Localización	Fecha	Edad (años)	Densidad (árboles/ha)	Pr (mm)	Pl (% de Pr)	FT (% de Pr)	Intercep. (% de Pr)	Referencia
O Martelo	1997-98	25-30	625	2015	74	4	26	Este trabajo
Goente	"	25-30	625	1961	78	11	22	"
Muras	"	25-30	625	1621	46	2	54	"
A Coruña	1975	15	820	1358	63	8	29	Calvo de Anta <i>et al.</i> (1979)
A Coruña	1991-93	-	1000	1637	46	-	-	Fernández -Vega(1998)
País Vasco	1993-94	15	1750	1426	63	-	37	Amezaga <i>et al.</i> (1997)
		15	1025	1071	74	-	26	
Australia	1976-78	-	-	1149	74	1	25	Feller (1981)
Australia	1978-81	16	1708	798	73	11	-	Crockford y Richardson (1990)
Nueva Zelanda	1998-00	-	-	900	-	-	20	Fahey <i>et al.</i> (2001)
Chile	1982-88	25	733	1969	74	11	15	Huber y Oyarzún (1990)

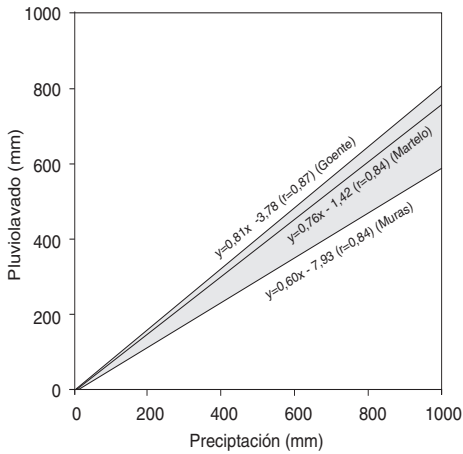


Fig.1. Correlaciones entre precipitación y pluviolavado medio en los sistemas forestales con *P. radiata* considerados (datos acumulados: periodo 1997-99)

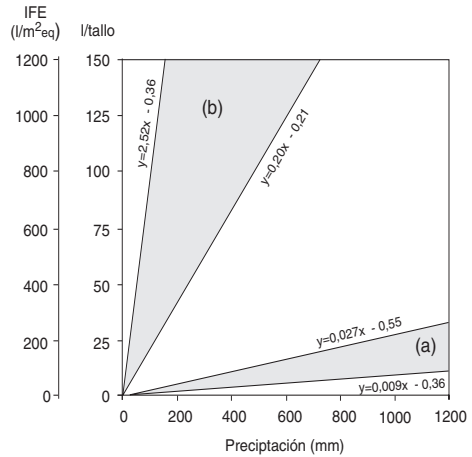


Fig.2. Campos de correlación entre el flujo de tallo y la precipitación (considerados acumulativamente). (a): periodo seco (junio-septiembre); (b): periodo húmedo (septiembre a mayo). Se representan las ecuaciones extremas obtenidas en el conjunto de las tres parcelas (IFE: intensidad de flujo equivalente)

con *P. radiata* de la región (con edad, marco de plantación... etc., como los estudiados), desde un punto de vista edáfico los datos medios no representan adecuadamente la variabilidad espacial del sistema. En la Fig.3 se representan acumulativamente todos los registros obtenidos en los pluviómetros de las tres parcelas. En todos los casos los colectores situados en los extremos muestran una elevada interceptación de la precipitación (incluso >50%), que se divide en dos componentes, la evaporación (interceptación propiamente dicha) y la traslocación vertical y desplazamiento hacia el centro del árbol, en donde el flujo de tallo representa el valor máximo de esta componente de concentración.

Teniendo en cuenta todos los resultados se ha establecido un modelo de distribución heterogénea de entrada de agua al suelo en estos sistemas, considerando tramos de variación de 10 cm de ancho y valorando de modo ponderado el pluviolavado por copa ($\sum P_{lc}$),

el flujo de tallo (F_{tc}) y la infiltración “libre” (sin interceptación) entre copas (PI_l) (Tabla 4). La representación de estos resultados teniendo en cuenta el marco de plantación existente (Fig.4), permite reconocer la importante variabilidad espacial de los flujos de intensidad efectiva de entrada de agua a estos suelos, según microsistemas particulares, concéntricos, con gradientes de entrada que varían en un orden de, al menos, 13 veces, entre 15000 l/m² (intensidad de flujo medio en las áreas más próximas al tronco), con un máximo de más del doble, y 1000 l/m² (en los extremos de las copas). Por otra parte, entre copas, el suelo recibe un volumen de igual magnitud que la precipitación, con un valor medio de 1866 l/m².

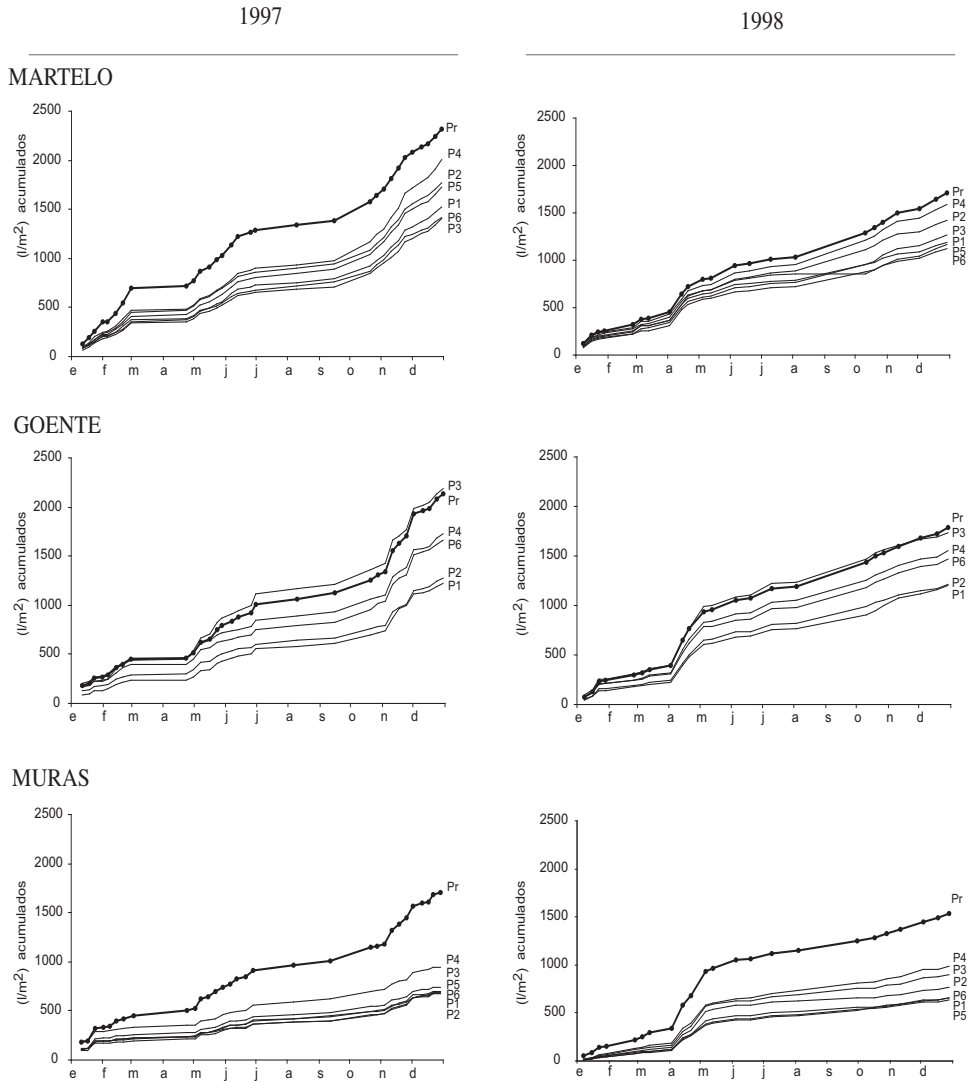


Fig.3. Registros de precipitación y pluviolavado en colectores situados a diferentes distancias del tronco en las tres parcelas del estudio.

Tabla 4. Gradiente de infiltración de agua e intensidad de flujo efectivo bajo las cubiertas arbóreas (se supone una distribución gradual en subsectores concéntricos de 10 cm de sección)

Subsector	Martelo			Goente			Murias			IFE L/m ² (datos medios)			
	1997		1998		1997		1998		1997		1998		
	IFE L/m ²	L _T	IFE L/m ²	L _T	IFE L/m ²	L _T	IFE L/m ²	L _T	IFE L/m ²		L _T	IFE L/m ²	L _T
FTc	1292.8	1518.2	9373.0	1324.7	1100.7	3655.9	2613.4	3069.1	4484.1	526.6	3714.4	436.2	
Plc	2157.7 ⁽⁴⁾	388.9	1597.7 ⁽⁴⁾	288.0	2243.7 ⁽³⁾	404.4	1873.9 ⁽³⁾	337.7	1255.6 ⁽⁴⁾	226.3	1122.6 ⁽⁴⁾	202.3	
	2430.36	516.8	1574.6*	382.7	2191.2*	532.5	1830.1*	444.8	1231.8*	299.4	1101.4*	267.7	
	3058.36	640.7	1551.4*	474.5	2138.8*	654.1	1786.3*	546.3	1208.1*	369.5	1080.2*	330.4	
	3686.36	760.8	1528.2*	563.3	2086.3*	769.1	1742.5*	642.3	1184.5*	436.6	1059.0*	390.4	
	4314.36	876.9	1505.0*	649.3	2033.8*	877.5	1698.7*	732.9	1160.8*	500.8	1037.8*	447.7	
	4942.36	989.0	1481.8*	732.4	1981.3*	979.2	1654.9*	817.9	1137.1*	562.0	1016.7*	502.5	
	5570.36	1097.3	1458.6*	812.5	1928.9*	1074.5	1611.1*	897.4	1113.4*	620.2	995.5*	554.5	
	6198.36	1201.6	1435.4*	889.7	1876.4*	1163.1	1567.3*	971.5	1089.7*	675.4	974.3*	603.9	
	6826.36	1301.9	1412.2*	964.0	1823.9*	1245.1	1523.5*	1040.0	1066.0*	727.7	953.1*	650.6	
	7454.36	1398.4	1389.0*	1035.4	1771.5*	1320.5	1479.7*	1103.0	1042.3*	777.0	931.9*	694.7	
	8082.36	1490.9	1365.8*	1103.9	1719.0*	1389.4	1435.9*	1160.5	1018.6*	823.3	910.8*	736.1	
	8710.36	1579.4	1342.6*	1169.5	1666.5*	1451.6	1392.1*	1212.6	994.9*	866.6	889.6*	774.9	
	9338.36	1664.1	1319.4*	1232.1	1614.1*	1507.3	1348.3*	1259.1	971.3*	907.0	868.4*	810.9	
	9966.36	1744.8	1296.2*	1291.8	1561.6*	1556.3	1304.5*	1300.1	947.6*	944.4	847.2*	844.4	
	10594.36	1821.6	1273.0*	1348.7	1509.1*	1598.8	1260.7*	1335.6	923.9*	978.8	826.0*	875.1	
	11222.36	1894.4	1249.8*	1402.6	1456.6*	1634.6	1216.9*	1365.6	900.2*	1010.2	804.9*	903.2	
	11850.36	1963.4	1226.2*	1453.1	1404.2*	1664.0	1173.1*	1390.2	876.5*	1038.7	783.7*	928.7	
	12560.00	2059.9	1203.4 ⁽³⁾	936.5	1351.7 ⁽¹⁾	1051.9	1129.3 ⁽¹⁾	878.8	852.8 ⁽⁵⁾	663.6	762.5 ⁽⁵⁾	593.4	
ΣPlc	-	22595.9	-	16730.0	-	20873.9	-	17436.3	-	12427.5	-	11111.4	
FT+Plc	-	24114.1	-	17830.7	-	24529.8	-	20505.4	-	12954.1	-	11547.6	
PlL	2315.0		1715.0		2136.7		1785.1		1710.5		1530.5		
												1865.5	

FTc: flujo/taño; Plc: Pluviolavado bajo cubierta; PlL: Pluviolavado libre; S_{AF}: superficie de la corona circular afectada según el modelo utilizado (desde el extremo del tronco); IFE: Intensidad de flujo efectivo

(Pl⁽⁴⁾ y Pl⁽³⁾): datos calculados a partir de las ecuaciones obtenidas en los pluviómetros más próximos y más alejados del tronco (Martelo); Pl⁽³⁾ y Pl⁽¹⁾: idem Goente; Pl⁽⁴⁾ y Pl⁽⁵⁾: idem Murias; (*) datos estimados considerando una distribución gradual entre los valores extremos, según coronas circulares de 10 cm de sección) (radio tronco medio: 13.7cm). Pl⁽⁴⁾=0.93PR-3.08; Pl⁽³⁾=0.70PR-3.10; Pl⁽⁵⁾=1.05PR-3.67; Pl⁽¹⁾=0.63PR; Pl⁽¹⁾=0.74PR-8.6; Pl⁽⁵⁾=0.50PR-5.37

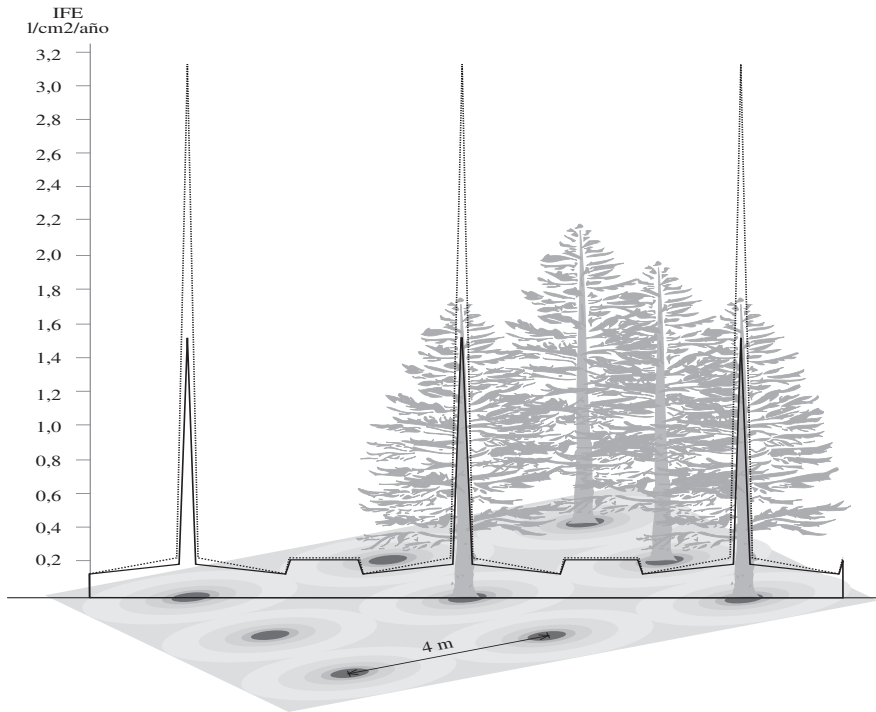


Fig.4. Representación de la variabilidad espacial de la intensidad de flujo efectivo de entrada de agua al suelo en sistemas forestales con *P. radiata* de Galicia (calculada a partir de los datos de las parcelas de O Martelo y Goente, 1997-1999)..

La existencia de microsistemas de diferente grado o intensidad de evolución en los suelos forestales ha sido frecuentemente señalada tanto por lo que se refiere a flujos de agua como de elementos, particularmente cuando se consideran los aportes por ácidos orgánicos lixiviados de cubiertas y troncos vegetales. Obviamente, no sólo tienen importancia los parámetros intrínsecos a la especie vegetal (índice de cobertura foliar, hidrofobicidad, pendulamiento, forma e inclinación de las ramas,...) (Herwitz, 1987) y los relacionados con el clima, sino aquellos que tienen que ver con el manejo del suelo, especialmente el marco de plantación y la productividad, que condiciona, entre otros, los turnos de corta. Dado que en Galicia, el crecimiento medio de *Pinus radiata* supera frecuentemente los 13

m³/ha/año, un individuo de 20 años puede alcanzar un porte superior a 20 m y, consiguientemente, influir decisivamente en la distribución del flujo de entrada de agua al suelo. Por otra parte, tratándose de bosques maderables con turnos de corta entre 20-25 años, los parámetros del ciclo hidrológico modifican temporalmente la configuración de su patrón de distribución espacial en estos mismos periodos de tiempo, dependiendo de la posición de los individuos en las sucesivas plantaciones.

Si estas consideraciones tienen su importancia cuando se considera la evolución de los suelos forestales en condiciones libres, o de muy bajo índice, de contaminación atmosférica, habrán de adquirir especial relevancia al considerar áreas afectadas de deposición

húmeda y/o seca, dado que el proceso de interceptación supone un posterior aporte adicional al suelo (frente a suelos no forestados) que se distribuye con la misma variabilidad espacial que el flujo de agua y, por lo tanto, con diferente intensidad, tiempo de contacto... y, probablemente, posibilidad de amortiguación en el suelo.

Las aguas recogidas en los lisímetros de relleno estandar (LRE) situados bajo los horizontes superficiales del suelo representan anualmente entre un 50 y un 60% de la precipitación, en las estaciones de mayor intensi-

dad de lluvia y alrededor de un 30% de la precipitación en la parcela con menor pluviosidad (Tabla 5). El cálculo del drenaje medio en la totalidad del suelo forestal resultó próximo al 60% de la precipitación en las parcelas de O Martelo y Goente (no fue posible realizar ajustes iso-cloro en la otra parcela por interferencias de suelos no forestales en la cuenca). Este valor resulta algo superior al obtenido en los horizontes superiores, lo que pone de manifiesto la importancia del flujo de tallo, que no se considera adecuadamente en los lisímetros de relleno.

Tabla 5. Síntesis de los parámetros del ciclo hidrológico calculados aplicando el modelo de distribución heterogénea ($\text{radio}_{\text{copa}}:2\text{m}$; $\text{sup.copa}:12.56 \text{ m}^2$; $\text{sup.}\Sigma\text{copas}:7850 \text{ m}^2/\text{ha}$ (78.5%); $\text{sup.libre}:2150 \text{ m}^2/\text{ha}$ (21.5%))

PR_T:Precipitation total; PR_C:Precipitation/copa; Pl_C: Pluviolavado/copa; Pl_L:Pluviolavado libre; INT_C:interception/copa; INT_T:interception global; DR_A:drenaje hor.Ah; DR_{ST}:Drenaje suelo global; ET: evapotranspiración (Pl_L+Pl_C+FT-D_{ST})

	Martelo		Goente		Murás		Datos medios	Datos medios (Ma+Go)
	1997	1998	1997	1998	1997	1998		
PR _T (l/ha)	23150000	17150000	21367000	17851000	17105000	15305000	18654667	19880000
PR _C (l/copa)	29076.4	21540.4	26838.1	22420.9	21483.9	19223.1	23430.3	24969.3
Pl _C								
l/copa	22595.9	16730.0	20873.9	17436.3	12427.5	11111.4	16862.5	19409.0
(%PRC)	(77.7)	(77.7)	(77.8)	(77.8)	(57.8)	(57.8)	(72.0)	(77.7)
l/ha	14122438	10461500	13055237	10897688	7767188	6944625	10539063	12130641
(%PRT)	(61.0)	(61.0)	(61.1)	(61.1)	(45.3)	(45.4)	(56.4)	(61.0)
Pl _L								
l/ha	4977250	3687250	4593905	3837965	3677575	3290575	4010754	4274094
(%PRT)	(21.5)	(21.5)	(21.5)	(21.5)	(21.5)	(21.5)	(21.5)	(21.5)
FT								
l/tallo	1518.2	1100.7	3655.9	3069.1	526.6	436.2	1719.5	2338.6
(%PRC)	(5.2)	(5.1)	(13.6)	(13.7)	(2.5)	(2.3)	(7.3)	(9.4)
l/ha	948875	687938	2286269	1918188	329125	272625	1074688	1461625
(%PRT)	(4.1)	(4.0)	(10.7)	(10.8)	(1.9)	(1.8)	(5.8)	(7.3)
INT _C								
l/copa	4962.3	3709.7	2307.1	1915.5	8529.8	7675.5	4850.0	3223.7
(%PRC)	(17.1)	(17.2)	(8.6)	(8.5)	(39.7)	(39.9)	(20.7)	(12.9)
INT _T								
l/ha	3102100	2313312	1431589	1196017	5336760	4797188	3029494	2010755
(%PRT)	(13.4)	(13.4)	(6.7)	(6.7)	(31.2)	(31.3)	(16.2)	(10.1)
DR _A								
l/ha	10630190	10306080	10416500	10142580	4868880	5160950	8587530	10373838
(%PRT)	(45.9)	(60.1)	(48.8)	(56.8)	(28.5)	(33.7)	(46.0)	(52.2)
DR _{ST}								
l/ha	10885690	10630160	14764230	13071390	-	-	-	12337868
(%PRT)	(47.0)	(62.0)	(69.1)	(73.2)	(62.1)			
ET								
l/ha	9162873	4206528	5171181	3582451	-	-	-	5530758
(%PRT)	(39.6)	(24.5)	(24.2)	(20.1)				(27.8)

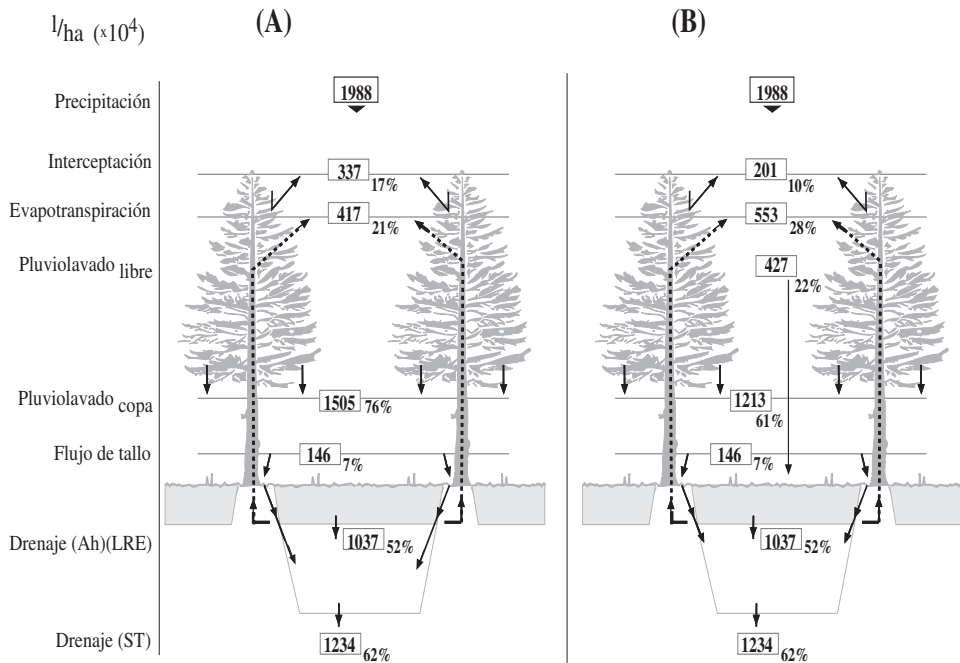


Fig. 5. Cálculo del balance hídrico en los sistemas forestales de O Martelo y Goente (1997-1999). (A): obtenido a partir de los valores medios de los registros de pluviolavado. (B): datos ponderados aplicando el modelo de distribución heterogénea

Una síntesis del balance hídrico resultante aplicando el modelo de distribución heterogénea se recoge en la Tabla 5. El cálculo de las entradas absolutas estimadas mediante ponderación resulta diferente al obtenido a partir de datos medios de los pluviómetros. Así, tomando como ejemplo los datos de las dos estaciones con mayor pluviosidad (Martelo y Goente), la infiltración media anual obtenida por ponderación asciende a un 90% de la precipitación (61% como suma de los pluviolavados de copa, 22% como infiltración libre y 7% como flujo de tallo); utilizando el modelo convencional la infiltración media anual es el 83% de la precipitación (Fig.5). Como resultado de estas diferencias, el cálculo de la interceptación por las cubiertas resulta inferior en el primer caso (10% de

P) que en el segundo (17% de P) y, así mismo, la evapotranspiración, calculada por diferencia entre las entradas y las salidas del suelo en su conjunto, resulta diferente (28% o 21%) según el procedimiento empleado.

CONCLUSIONES

A partir de los registros de agua obtenidos a lo largo de dos años completos en tres parcelas forestadas con *Pinus radiata* en Galicia se establecen los balances de agua en los sistemas aplicando dos métodos de cálculo, un modelo simple, que considera los valores medios de precipitación, pluviolavado, flujo de tallo y drenaje y un modelo de distribución heterogénea, que establece un cálculo ponderado de las entradas teniendo en cuenta

su distribución espacial. Los balances globales obtenidos por ambos procedimientos son algo diferentes al ser distinto el resultado contabilizado para la entrada neta a los suelos (83 y 90% de la precipitación, según se aplique el modelo convencional o el ponderado).

El flujo de tallo considerado en términos absolutos es poco significativo (7% de la precipitación), sin embargo, si se considera el peso de este volumen en la pequeña superficie de suelo afectada y la diferencia de flujo entre esta zona y otras adyacentes situadas bajo las cubiertas, se obtiene una valoración más adecuada de este factor, que resulta de una concentración sucesiva por traslocación vertical y deslizamiento hacia el interior del exceso de precipitación. En periodos de chubascos espaciados y poco intensos, la densa cobertura foliar de *Pinus radiata* presenta una elevada capacidad de captación (y evaporación) y el flujo de tallo no se produce o es irrelevante, pero durante la estación lluviosa (Octubre-Mayo) la intensidad de flujo equivalente alrededor de los troncos puede ser >15000 l/m²/año, 13 (hasta 20) veces la existente en otras áreas del suelo, de manera que la dinámica de evolución de los suelos forestales de la región debe estar fuertemente afectada por este patrón de comportamiento, muy diferente al de áreas próximas de pradera o cultivo.

Dado que a la intensa pluviosidad de la región se añade una elevada productividad (respecto a la de otras áreas más frías), el ritmo de evolución de los suelos forestales maderables está condicionado por turnos de tala y plantación relativamente cortos (20-25 años) de manera que no sólo sigue un patrón fuertemente heterogéneo en el espacio, sino también en el tiempo.

Las consideraciones anteriores adquieren especial relevancia cuando se extrapolan a áreas sometidas a procesos de contaminación atmosférica (húmeda y seca), dado el fuerte poder de captación de la deposición por la copa de las coníferas. La fuerte heterogenei-

dad de la distribución de las disoluciones contaminadas deberá traducirse en un diferente tiempo de contacto, y amortiguación, en diferentes zonas del suelo.

REFERENCIAS

- Amezaga, A., Gonzalez Arias, A., Echeandia, A., Onaindia, M. (1997). Atmospheric deposition and canopy interactions for conifer and deciduous forests in northern Spain. *Water Air Soil Pollut.* 97, 303-313.
- Aussenac, G., Granier, A. (1988). Effects of thinning on water stress and growth in Douglas-fir. *Can. J. For. Res.* 18, 100-105.
- Calvo de Anta, R. (1992). El eucalipto en Galicia. Sus relaciones con el medio natural. Universidad de Santiago de Compostela. 211p.
- Calvo de Anta, R.; Paz Gonzalez, A.; Diaz-Fierros, F. (1979). Nuevos datos sobre la influencia de la vegetación en la formación del suelo en Galicia. I: Interceptación de la precipitación. *An. Edafol. Agrob., XXXVIII.* 1151-1163.
- Crockford, R.H.; Richardson, D.P. (1990). Partitioning of rainfall in a eucalypt forest and pine plantation in southeastern Australia: II. Stemflow and factors affecting stemflow in a dry sclerophyll eucalypt forest and a *Pinus radiata* plantation. *Hydrol. Process.* 4, 145-155.
- Dambrine, E., Antonio Vega, J., Taboada, T., Rodríguez, L., Fernández, C., Macias, F., Gras, J.M. (2000). Bilans d'éléments minéraux dans de petits bassins versants forestiers de Galice (NW Espagne). *Ann. For. Sci.* 57, 23-38.
- Domingo, F., Puigfabregas, J., Moro, M.J., Bellot, J. (1994). Role of vegetation cover in the biogeochemical balances of a small forested catchment in southeastern Spain. *J. Hydrol.* 159, 275-289.

- Fahey, B., Watson, A., Payne, J. (2001). Water loss from plantations of Douglas-fir and radiata pine on the Canterbury Plains, South Island, New Zealand. *J. Hydrol. N Z* 40(1), 77-96.
- Falkengren-Grerup, U. (1989). Effect of stemflow on beech forest soils and vegetation in southern Sweden. *J. Appl. Ecol.* 26, 341-352.
- FAO. (1998). World Reference Base for Soil Recourses. FAO/ISRIC/SICS. Roma, Italia. 91pp.
- Feller, M.C. (1981). Water balances in *Eucalyptus regnans*, *E. obliqua*, and *Pinus radiata* forests in Victoria. *Aust. For.* 44, 153-161.
- Fernandez-Vega, V. (1998). Flujo de precipitación, pluviolavado y escorrentía en la cuenca alta del río Sor. Aplicación de un balance de elementos al estudio de los efectos de la deposición atmosférica. Tesis Doctoral. Facultad de Biología. Universidad de Santiago de Compostela.
- Gesper, P.L., Holowaychuk, N. (1971). Some affects of stem flow from forest canopy trees on chemical properties of soils. *Ecology.* 52, 691-702.
- Gras, j.m. (1993). Investigación sobre las relaciones hídricas de las plantaciones de *Eucalyptus globulus* en Galicia. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Madrid.
- GOMEZ REY, M.X. (2002). Efectos de la deposición atmosférica ácida sobre la dinámica del suelo y los ciclos biogeoquímicos en sistemas forestales de Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Huber, A.W., Oyarzun, C.E. (1990). Variaciones anuales en precipitación, escurrimiento e intercepción en un bosque adulto de *Pinus radiata*. *Turrialba.* 40, 503-508.
- Huber, A.W., Oyarzun, C.E. (1992). Redistribución de las precipitaciones en un bosque siempre verde del sur de Chile. *Turrialba.* 42, 192-199.
- Mahendrappa, M.K. (1989). Impacts of forests on water chemistry. *Water. Air Soil Pollut.* 46, 61-72.
- Paz Gonzalez, A., Diaz-Fierros Viqueira, F. (1985). Contribución al conocimiento de la utilización del agua del suelo por las especies forestales (*Quercus robur* y *Pinus pinaster*) bajo clima templado humedo. *An. de Edaf. y Agrobiol* V. 44(7-8), 1081-1100.
- Whitehead, D., Kelliher, F.M. (1991). A canopy water balance model for a *Pinus radiata* stand before and after thinning. *Agric. For. Meteorol.* 55, 109-126.
- Zinke, P.J. (1962). The pattern of influence of individual forest trees on soil properties. *Ecolog.* 43, 130-133.

DISTRIBUCIÓN DE ALGUNOS ELEMENTOS MAYORES (K, Ca, Ti, Fe) Y TRAZA (Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Br) EN DOS SUELOS POLICÍCLICOS PODSÓLICOS.

E. PEITEADO VARELA, R. PIÑEIRO REBOLO, A. MARTÍNEZ CORTIZAS

Departamento de Edafología y Química Agrícola, Universidad de Santiago de Compostela, Campus Sur s/n, 15782 Santiago de Compostela

Abstract. Two polycyclic podzolic soils from northwestern Spain were analyzed for some major and trace elements. Pena Cebral (PC) is located in Serra dos Ancares and is composed by a basal mixed coluvium of shales and phylites, buried by a quartzitic coluvium; while Curro Vello II (CVII) is situated in the Serra do Xistral and developed on a granodioritic coluvium. The vertical distribution of four major (K, Ca, Ti, Fe) and 6 trace elements (Ga, Rb, Sr, Y, Zr y Br) in the fine earth (FE, <2mm) and the silt+clay fraction (SC, <50 μm) was studied using detailed concentrations profiles, concentration ratios between fractions and enrichment factors. The concentrations obtained for the fine earth of PC were: K 1.9-4.0%; Ca is below the detection limit (<0.01%) in all samples except for the upper most one (O horizon); Ti 0.3-0.5%; Fe 1.4-4.1%; Ga 9.7-18.3 mg kg⁻¹; Rb 87.3-139.6 mg kg⁻¹; Sr 20.8-48 mg kg⁻¹; Y 20-50.8 mg kg⁻¹; Zr 271.4-630 mg kg⁻¹; Br 2.8-30 mg kg⁻¹. In CVII the concentrations determined ranged: K 1.3-3.3%; Ca 0.14-0.25%; Ti 0.08-0.25%; Fe 1.0-3.1%; Ga 11.1-21.2 mg kg⁻¹; Rb 84.9-132.4 mg kg⁻¹; Sr 41-52 mg kg⁻¹; Y 9.6-53.9 mg kg⁻¹; Zr 75.7-205 mg kg⁻¹; Br 42.1-362.9 mg kg⁻¹. Both soils have lower average concentrations of Ca and Sr and higher Fe in CVII and Zr in PC than those reported by other researchers for the parent materials of the areas where they are located. All the elements, exception made of the K, Ca and Sr in CVII, showed higher concentrations in the SC than in the FE and than those estimated for the sands (up to 4.5 times in PC and 2.5 times in CVII).

Both the distribution profiles and the fractionation of elements seems to be the result of the interplay of several factors. The influence of the parent material mineralogy is expressed in higher Sr concentrations in CVII than in PC while the opposite is true for K, Ti, Fe, Zr, Y and the proportion of fine material (igneous material versus metamorphic material). The higher concentrations of the elements in the SC, particularly for the more mobile ones (K, Ca, Sr), in PC soil indicate a lower degree of evolution. In CVII these elements are depleted in the SC indicating a greater degree of chemical evolution, showing in both cases the effect of the geochemical environment (weathering and pedogenesis). Results also indicate that Fe and Br, and to some extent Ti, are mobile in these soils due to podzolization. The accumulation of Br in the spodic horizons suggests that the element is incorporated into the soil organic matter in the surface horizons and transported down in the profile by mobile organic compounds, something which is consistent with recent work on the halogenation of the soil organic matter. Thus, Br seems to be a good indicator of the intensity of the podzolisation, although further research is necessary to elucidate the mechanisms. On the other hand, this element is subjected to a pronounced source effect, with concentrations 15 times higher in CVII than in PC, as it should be expected given the proximity to the ocean of the former soil.

Key words: polycyclic soils, podzolisation, major elements, trace elements, bromine.

Resumen. Se estudiaron dos suelos policíclicos podsólicos del noroeste de la Península Ibérica: Pena Cebral (PC) en la Serra de Os Ancares, con un ciclo basal desarrollado sobre pizarras y filitas enterrado por un depósito de cuarcitas; y Curro Vello II (CVII) en la Serra do Xistral, desarrollado sobre material granodiorítico. Se estudió la distribución vertical de cuatro elementos mayores (K, Ca, Ti, Fe) y seis traza (Ga, Rb, Sr, Y, Zr y Br) en la tierra fina (TF, <2 mm) y en la fracción limo+arcilla (LA, <50 µm) empleando tanto perfiles concentración como relaciones entre las diferentes fracciones y factores de enriquecimiento. Las concentraciones obtenidas para la tierra fina en el suelo de PC fueron: K 1.9-4.0%; el Ca está por debajo del límite de detección a excepción del horizonte O; Ti 0.3-0.5%; Fe 1.4-4.1%; Ga 9.7-18.3 mg kg⁻¹; Rb 87.3-139.6 mg kg⁻¹; Sr 20.8-48 mg kg⁻¹; Y 20-50.8 mg kg⁻¹; Zr 271.4-630 mg kg⁻¹; Br 2.8-30 mg kg⁻¹. En el suelo de CVII, las concentraciones varían entre 1.3-3.3% para el K; Ca 0.14-0.25%; Ti 0.08-0.25%; Fe 1.0-3.1%; Ga 11.1-21.2 mg kg⁻¹; Rb 84.9-132.4 mg kg⁻¹; Sr 41-52 mg kg⁻¹; Y 9.6-53.9 mg kg⁻¹; Zr 75.7-205 mg kg⁻¹; Br 42.1-362.9 mg kg⁻¹. Ambos suelos presentan concentraciones medias más bajas de Ca y Sr y más elevadas de Fe en el caso de CVII y de Zr en el caso de PC que las dadas para los materiales de partida de los respectivos entornos. Todos los elementos, a excepción de K, Ca y Sr en CVII, presentaron concentraciones más elevadas en la fracción LA que las de TF o las estimadas para la arena (hasta 4.5 veces en PC y 2.5 en CVII).

La distribución tanto vertical como entre las distintas fracciones granulométricas parece ser el resultado de la combinación de diversos factores. La influencia de la naturaleza mineralógica del material de partida queda reflejada en mayores concentraciones de Sr en CVII y de K, Ti, Fe, Zr e Y en PC, así como mayor proporción de fracciones finas en este último suelo. Además, concentraciones más elevadas en las fracciones finas, especialmente para los elementos móviles -K, Ca, Sr- tal y como ocurre en PC, se relacionan con un menor grado de evolución de la fase sólida. En CVII, sin embargo, estos elementos más móviles se encuentran en mayor concentración en la TF, lo que indica un mayor grado de meteorización en este suelo. Los datos muestran también que el Fe, Br, y tal vez Ti, se ven influenciados por el proceso de podsolización. Los resultados encontrados para la acumulación de Br en los horizontes espódicos sugieren que este elemento podría ser incorporado a la materia orgánica en la superficie del suelo y transportado en profundidad por compuestos orgánicos móviles, algo en consonancia con los últimos trabajos sobre halogenación de la materia orgánica en los suelos. Por ello, el Br parece ser un buen indicador de la intensidad de este proceso edafogénico, aunque es necesario investigar en mayor profundidad sobre los mecanismos implicados. Este último elemento muestra un marcado efecto fuente, con concentraciones en CVII del orden de 15 veces las de PC, como cabría esperar dada la mayor proximidad del primero al océano.

Palabras clave: suelos policíclicos, podsolización, elementos mayores, elementos traza, bromo.

INTRODUCCIÓN

El contenido y la distribución de elementos -mayores y traza- en suelos depende de la naturaleza litológica del material de partida, de los procesos de meteorización, de la edafogénesis, de los procesos geomórficos y de la deposición atmosférica vía húmeda o seca procedente de fuentes naturales o antrópicas. El peso de cada uno de estos factores principales depende del grado de evolución del suelo -para suelos débilmente evolucionados la influencia del material de partida es muy importante- y de la movilidad del elemento específico en el sistema. Pero además, influ-

yen diversos factores externos (procesos morfogenéticos, uso del terreno, vegetación).

Siguiendo esta línea de investigación, el estudio de la distribución de algunos elementos ha sido empleado para identificar discontinuidades en perfiles policíclicos, especialmente aquellas relacionadas con procesos de erosión-sedimentación. Entre episodios erosivo-sedimentarios el suelo presenta una superficie estable que se verá enriquecida en diversos elementos a través de varios mecanismos como son la meteorización, la edafogénesis, los biociclos y la deposición atmosférica, descritos por Rose *et al.* (1979). En otros estudios se ha comprobado que en los

suelos ácidos una elevada proporción de metales traza es retenida en los horizontes superficiales por la materia orgánica, lo cual limita su actividad, por lo que éstos, aunque posteriormente puedan ser enterrados, presentarán una mayor concentración de metales traza que aquellos horizontes que nunca hayan estado expuestos (Franco Maside *et al.*, 2000; Martínez Cortizas *et al.*, 2000).

Por lo tanto, el contenido de elementos traza en suelos resulta de gran interés en la interpretación pedogenética ya que constituye una herramienta para decidir la relevancia de cada uno de los factores principales que afectan a la evolución del suelo (Laruelle & Stops, 1967; Fujikawa *et al.*, 2000). Como han señalado Kurtz *et al.* (2000), los perfiles de meteorización son complejos sistemas geoquímicos comparables a una columna cromatográfica.

En este estudio se presentan los resultados del análisis de cuatro elementos mayores (K, Ca, Ti, Fe) y seis elementos traza (Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Br) en la tierra fina (<2mm) y en la fracción limo+arcilla (<50µm) de dos suelos policíclicos podsólicos de áreas de montaña de Galicia (NW de la Península Ibérica). Se ha analizado la distribución vertical y el fraccionamiento de los elementos empleando concentraciones, relaciones entre las diferentes fracciones y factores de enriquecimiento. La elección de perfiles de carácter policíclico se debe en parte al interés por conocer cómo afectan los procesos de erosión/sedimentación a la evolución de los suelos, habida cuenta de que en estas áreas la frecuencia de estos procesos dificulta la existencia de perfiles monocíclicos/monogenéticos; por otra parte, el carácter policíclico los hace especialmente importantes a la hora de aportar información paleoambiental. El hecho de que además se trate de dos suelos podsólicos implica que existe un proceso dominante que conlleva la movilización en profundidad de diversos elementos químicos (no sólo Fe y Al).

En particular, los objetivos del presente estudio son: 1) conocer la distribución vertical de estos elementos en suelos complejos; 2) determinar el grado de fraccionamiento por medio de las concentraciones en las fracciones finas (limo y arcilla); y 3) obtener información sobre los factores que afectan a la distribución tanto vertical como en las distintas fracciones granulométricas de los elementos químicos en estos suelos.

MATERIAL Y MÉTODOS

Localización del área de estudio

Los dos suelos estudiados en este trabajo se encuentran ubicados en áreas de montaña del noroeste de la Península Ibérica, en zonas de rellano en laderas de fuerte inclinación: Curro Vello II (CVII) en la Serra do Xistral, a 700 m s.n.m, y Pena Cebral (PC) en la Serra dos Ancares, a 1120 m. s.n.m. (Figura 1). Estas áreas de montaña se caracterizan por una elevada pluviosidad con una tendencia a una distribución bastante homogénea a lo largo del año. En el Xistral, donde algunos años se llegan a superar los 2000 mm anuales, el gradiente pluviométrico es muy marcado, de unos 100 mm por cada 100 m de altitud, y aunque se produce un ligero descenso de la precipitación en el verano la estacionalidad pluviométrica es débil. En el nivel altitudinal donde se localiza el perfil de CVII la precipitación anual acumulada es de unos 1500 mm. Os Ancares se aproxima también a los 2000 mm anuales en algunos sectores de cumbre; el gradiente pluviométrico es algo menor, unos 75 mm por cada 100 m de altitud, y en este caso las frecuentes tormentas de verano provocan una moderada estacionalidad. Para el lugar de ubicación del perfil de PC la precipitación anual acumulada es igualmente próxima a los 1500 mm. Las temperaturas medias anuales son similares en ambas áreas: en torno a 9,5°C para CVII y 8,5°C para PC; en invierno las temperaturas medias son de 4-6°C y 2-4°C, en CVII y PC respec-

tivamente; mientras que las temperaturas medias de verano son similares (de 16 a 18°C en CVII y de 14 a 16°C en PC) (Martínez Cortizas & Pérez Alberti, 1999).



Figura 1. Localización de las áreas de estudio y secuencia de horizontes de los perfiles de Pena Cebral (PC) y Curro Vello II (CVII).

Material

Ambos suelos (PC y CVII) fueron muestreados en el año 1996. Las muestras se tomaron a intervalos regulares de 5 cm, hasta una profundidad de 1,05 m en Curro Vello II y 2,20 m en Pena Cebral. En PC sólo se tomaron dos muestras del horizonte más profundo: una en el límite superior y otra hacia la base del perfil. La caracterización físico-química y mineralógica de estos suelos, así como su clasificación ha sido realizada anteriormente por Moares Domínguez (1997) (Tabla 1), quien los definió como suelos policíclicos podsólicos.

El perfil de PC está localizado en una ladera sobre la que afloran materiales geológicos pertenecientes a las Capas inferiores del río Eo, en las que alternan filitas, esquistos, pizarras y cuarcitas. El perfil presenta cinco ciclos desarrollados sobre distintos

materiales litológicos debido a que el material basal, compuesto casi exclusivamente por pizarras y filitas, está enterrado por un depósito coluvial rico en cantos angulares de cuarcita y capas de material más fino con frecuentes gravas y piedras. Esta discontinuidad litológica (ubicada a 135 cm de profundidad) es la que separa los ciclos IV y V, mientras que el criterio empleado para diferenciar los restantes es la presencia de horizontes A enterrados.

Según el análisis mineralógico (Moares Domínguez, 1997) el cuarzo aparece como mineral dominante en la tierra fina (TF), sobre todo en los tres primeros ciclos, aumentando en los más profundos la proporción relativa de mica y otros minerales accesorios, hecho que se relaciona con la predominancia de material cuarcítico en los ciclos superficiales. En la arcilla dominan los minerales heredados: micas escasamente evolucionadas a interestratificados mica-vermiculita en los ciclos III y IV.

En CVII se han descrito cuatro ciclos de formación desarrollados sobre un único tipo de material litológico, granodiorita tardía del macizo de la Toxiza. El ciclo superficial se compone de material menos meteorizado que el subyacente y se separa de este mediante un límite brusco; una línea de piedras de granodiorita alterada es el criterio para separar los ciclos II y III. Aunque en trabajos previos (Moares Domínguez, 1997) los ciclos III y IV se consideraron como uno único, evidencias como la presencia de una línea de carbones así como la distribución de diversos elementos traza que será explicada posteriormente nos han llevado a considerarlos como ciclos distintos.

Al tratarse de un suelo desarrollado a partir de material granodiorítico, los feldespatos son los minerales más abundantes en la tierra fina, sobre todo en los horizontes A, mientras que en los más profundos aumenta la proporción de filosilicatos. La arcilla está compuesta por filosilicatos 1:1 y 2:1, gibbsi-

Tabla 1. Descripción morfológica de los horizontes de los suelos PC y CVII (Color: h-húmedo, s-seco; Grado de estructura: mf-moderada a fuerte, m-modelada, d-débil, md-muy débil; Tipo de estructura: mf-migajosa fina, mm-migajosa media, gf-granular fina, gm-granular media, mfm-migajosa fina y media, gfm-granular fina y media, b-en bloques subangulares; Límite: b-brusco, n-neto, g-gradual, d-difuso, p-plano, o-ondulado). Valores medios y desviación estándar para la granulometría, reacción del suelo, componentes orgánicos (C- carbono total, N- nitrógeno total) y complejo de intercambio catiónico (CIC-capacidad de intercambio catiónico efectiva, SatAl- saturación del complejo de intercambio en Al). Datos tomados de Moares Domínguez (1997)

HTZ	Prof. cm	Color	Estruct	Límite	Arena	Limo %	Arcilla	pH H ₂ O	C %	N %	C.I.C.e cmolc/kg	SatAl %	Clasif.
O	0-5	7.5YR3/3(h)	m/mf	-	53,6	35,5	11,0	4,69	11,5	0,6	5,76	6,42	Cambisol húmico
		7.5YR5/3(s)											
	5-25	7.5YR3/3(h)	m/mf	g/p	66,4 (4,1)	26,3 (3,8)	7,2 (0,4)	4,27 (0,29)	2,35 (1,70)	0,10 (0,10)	5,24 (1,19)	76,1 (8,10)	
1A	25-45	7.5YR5/3(s)	m/mm	n/o	58,2 (6,2)	33,5 (4,5)	8,3 (1,7)	4,38 (0,12)	2,25 (0,60)	0,10 (0,00)	6,26 (1,62)	87,5 (2,90)	Cambisol húmico
		10YR6/3(s)											
2A	45-65	7.5YR2/2(h)	m/mfm	n/p	48,0 (1,8)	39,5 (1,9)	12,5 (0,3)	4,09 (0,05)	3,65 (0,70)	0,20 (0,00)	10,1 (0,93)	90,7 (0,76)	
		7.5YR3/1(h)											
3A	65-80	7.5YR5/2(s)	m/mm	d/p	39,6 (3,7)	46,1 (1,7)	14,2 (2,4)	3,94 (0,17)	4,69 (0,70)	0,20 (0,00)	14,6 (1,63)	88,9 (0,02)	Cambisol húmico
		7.5YR3/2(h)											
3AE	80-85	7.5YR5/2(s)	m/gm	d/p	47,1	41,7	11,2	4,10	1,90	0,10	11,2	96,2	
		7.5YR3/4(h)											
3Bs	85-100	7.5YR3/4(h)	d/gfm	n	45,2 (8,0)	42,0 (5,9)	12,8 (2,1)	4,20 (0,04)	2,02 (0,80)	0,10 (0,00)	10,1 (1,53)	95,7 (0,58)	Cambisol húmico
		7.5YR6/4(s)											
4A	100-125	7.5YR3/2(h)	d/gfm	g/p	48,5 (3,6)	39,8 (1,5)	11,8 (2,1)	4,26 (0,05)	2,00 (1,40)	0,10 (0,10)	9,23 (2,83)	95,0 (1,25)	
		7.5YR5/2(s)											
4E	125-135	7.5YR5/3(h)	d/gfm	g/p	42,3 (4,8)	40,9 (0,6)	16,9 (4,2)	4,31 (0,03)	1,02 (0,50)	0,10 (0,00)	9,75 (2,40)	96,4 (0,22)	Podzol háptico
		7.5YR7/1(s)											
5Bhs	135-150	7.5YR4/4(h)	d/gm	g/p	40,9 (3,8)	40,7 (0,7)	18,4 (3,4)	4,42 (0,08)	1,81 (0,60)	0,10 (0,00)	8,32 (3,16)	94,6 (0,72)	
		7.5YR5/4(s)											
5Bs/C	150-170	10YR6/6(h)	md/gfm	d/p	51,2 (3,3)	38,0 (1,7)	10,8 (1,6)	4,69 (0,07)	0,63 (0,20)	0,10 (0,00)	2,77 (0,61)	87,9 (1,03)	Podzol cámbico
		10YR7/4(s)											
5C	>170	10YR7/4(h)	-	-	59,3 (5,5)	32,5 (3,7)	8,1 (1,9)	4,91 (0,08)	0,19 (0,10)	0,00 (0,00)	1,33 (0,40)	73,6 (7,50)	
		10YR8/3(s)											
1A	0-45	10YR4/1(h)	d-m/mfmm	b/p	67,9 (4,5)	22,4 (3,0)	9,7 (2,2)	3,92 (0,09)	11,0 (2,70)	0,80 (0,20)	8,89 (2,82)	77,3 (13,93)	Podzol cámbico
		10YR5/2(s)											
2A	45-70	10YR7/1(h)	m/b	n/o	76,9 (1,5)	14,8 (1,4)	8,3 (0,5)	4,17 (0,10)	7,21 (1,80)	0,50 (0,10)	9,93 (2,85)	90,1 (1,50)	
		10YR2/2(s)											
3Bhs	70-85	10YR3/4(h)	m/b	g/o	69,9 (5,8)	18,6 (3,1)	11,4 (2,7)	4,37 (0,04)	5,53 (0,70)	0,30 (0,00)	6,08 (0,64)	93,1 (0,75)	Podzol cámbico
		10YR4/4(s)											
4Bhs	85-100	10YR3/4(h)	m/b	g/o	52,0 (2,7)	26,9 (2,1)	21,1 (1,8)	4,33 (0,01)	7,23 (0,60)	0,40 (0,00)	6,00 (0,44)	92,4 (0,51)	
		10YR4/4(s)											
4C	100-105	10YR4/6(h)	-	-	48,5	24,2	27,3	4,44	3,84	0,20	4,42	91,6	Podzol cámbico
		10YR6/3(s)											

ta y cantidades traza de cuarzo y feldespatos; los primeros son más abundantes en los ciclos I y II, mientras que la gibbsita es dominante en el III y el IV (Moares Domínguez, 1997).

Como muestran los resultados de la Tabla 1, se trata de suelos de reacción ácida, con pH en agua entre 3,8 y 4,7 y en KCl entre 3,0 y 4,3, ambos con tendencia a aumentar con la profundidad. Son sistemas sustractivos y fuertemente desaturados, con una capacidad de intercambio catiónica efectiva (CICe) muy baja. Los valores de CICe más elevados se encuentran en horizontes A enterrados, hasta 14,6 $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$ en PC y de 9,93 $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$ en CVII. Excepto para el Al, que tiene una saturación media superior al 75%, los niveles del resto de los cationes del complejo de intercambio son muy bajos, con tendencia a disminuir con la profundidad.

Las condiciones climáticas frías y húmedas predominantes en estas áreas de montaña favorecen la acumulación de materia orgánica en superficie que se moviliza en profundidad complejada con Fe y Al liberados por la alteración de los minerales primarios. Los

dos suelos presentan evidencias de acumulación de Fe y/o Al en más de un horizonte B (Tabla 2), característica que confirma su carácter policíclico al indicar que el proceso de podsolización no actuó de modo uniforme en el tiempo (Moares Domínguez *et al.*, 1996). Así, en Pena Cebral tanto el ciclo actual (ciclo I) como los ciclos II y III serían *Cambisoles húmicos*, mientras que los ciclos IV y V constituirían un *Podzol háplico* (Moares Domínguez, 1997). En CVII del ciclo basal, desarrollado *in situ*, sólo se conservan los horizontes 4C y 4Bhs; sobre éste aparece el ciclo III, que únicamente tiene un horizonte, el 3Bhs. Una discontinuidad estratigráfica separa este último del ciclo II, que está representado por un único horizonte (2A) el cual muestra algunos rasgos que sugieren cierto grado de podsolización (criptopodsolización). Por último, el ciclo superficial (I) está compuesto por materiales bastante frescos, con carácter de horizonte A. En su conjunto el suelo de CVII fue clasificado como un *Podzol cámbico* (Moares Domínguez, 1997).

Tabla 2. Medias y desviación estándar (entre paréntesis) para las extracciones selectivas de Fe, Al y materia orgánica activa por horizonte (Fed y Ald- Fe y Al en ditionito; Feo y Alo- Fe y Al en oxalato; Fep y Alp- Fe y Al en pirofosfato; Cp- carbono extraído en pirofosfato; Cp/Ct- relación entre el carbono extraído en pirofosfato y el carbono total).

HRZTE	Fed	Feo	Fep	Ald	Alo	Alp	Cp	Cp/Ct	
	%								
	1,55	0,19	0,15	0,12	0,11	0,11	1,87	0,20	
	1A	2,07 (0,21)	0,30 (0,06)	0,22 (0,02)	0,16 (0,01)	0,14 (0,02)	0,12 (0,02)	0,46 (0,42)	0,18 (0,10)
	1Bw	1,97 (0,08)	0,35 (0,09)	0,27 (0,05)	0,20 (0,03)	0,21 (0,05)	0,19 (0,02)	0,72 (0,37)	0,33 (0,17)
	2A	2,02 (0,13)	0,56 (0,10)	0,45 (0,14)	0,19 (0,02)	0,23 (0,03)	0,18 (0,02)	1,24 (0,34)	0,35 (0,06)
	3A	1,95 (0,22)	0,45 (0,18)	0,40 (0,18)	0,24 (0,04)	0,30 (0,03)	0,25 (0,05)	1,38 (0,56)	0,27 (0,12)
PENA	3AE	1,92	0,30	0,22	0,16	0,19	0,16	0,70	0,40
CEBRAL	3Bs	2,33 (0,18)	0,74 (0,16)	0,57 (0,27)	0,21 (0,09)	0,24 (0,05)	0,21 (0,08)	0,66 (0,53)	0,27 (0,12)
	4A	1,35 (0,11)	0,19 (0,12)	0,21 (0,12)	0,18 (0,08)	0,21 (0,10)	0,22 (0,12)	0,75 (0,68)	0,30 (0,14)
	4E	1,87 (0,52)	0,55 (0,42)	0,65 (0,46)	0,22 (0,12)	0,22 (0,09)	0,21 (0,10)	0,59 (0,23)	0,60 (0,14)
	5Bhs	2,90 (0,82)	1,54 (0,61)	1,60 (0,58)	0,47 (0,11)	0,42 (0,14)	0,41 (0,12)	0,87 (0,49)	0,47 (0,15)
	5Bs/C	1,61 (0,10)	0,43 (0,17)	0,43 (0,15)	0,23 (0,04)	0,19 (0,05)	0,19 (0,04)	0,21 (0,05)	0,38 (0,17)
	5C	1,10 (0,21)	0,08 (0,04)	0,10 (0,06)	0,10 (0,03)	0,07 (0,01)	0,09 (0,03)	0,26 (0,00)	1,55 (0,64)
	1A	0,95 (0,33)	0,66 (0,26)	0,80 (0,31)	0,39 (0,17)	0,35 (0,16)	0,52 (0,19)	4,51 (0,92)	0,43 (0,12)
CURRO	2A	1,80 (0,13)	1,18 (0,10)	1,53 (0,22)	1,01 (0,20)	0,89 (0,11)	1,15 (0,16)	4,62 (1,17)	0,64 (0,05)
VELLO II	3Bhs	1,52 (0,18)	0,91 (0,12)	1,07 (0,12)	1,83 (0,13)	1,67 (0,28)	1,75 (0,24)	3,83 (0,06)	0,70 (0,08)
	4Bhs	1,31 (0,09)	0,81 (0,09)	0,88 (0,19)	2,45 (0,21)	2,84 (0,18)	2,45 (0,36)	5,19 (1,15)	0,71 (0,10)
	4C	1,34	0,63	0,44	2,97	2,15	1,31	2,54	0,66

Métodos

Se determinó el contenido total de 4 elementos mayores (K, Ca, Ti, Fe) y 6 traza (Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Br) tanto en la tierra fina (TF, <2 mm) como en la fracción limo+arcilla (LA, <50 µm). Para separar la tierra fina de la fracción gruesa del suelo una vez secas al aire las muestras, se empleó un tamiz de 2mm de luz; la muestras obtenidas se molieron con un mortero de ágata y se homogeneizaron. La fracción fina (limo y arcilla) se obtuvo agitando 125 g de muestra de TF con 125 mL de agua ultrapura durante 16 horas y pasándola a través de un tamiz de 50µm; después de secar hasta peso constante la fracción LA se molió con un mortero de ágata y se homogeneizó.

Las concentraciones de los elementos se obtuvieron utilizando un equipo EMMA-XRF (Energy-dispersive Miniprobe Multielement Analyzer) en Key Analytical (Canadá), empleando radiación Mo K α o Mo K β (particularmente para el Zr). El EMMA así como su aplicación en el análisis de elementos han sido descritos en otros trabajos (Cheburkin & Shotyk, 1996; Weiss *et al.*, 1998; Shotyk *et al.*, 2000). El equipo fue calibrado usando materiales de referencia estándar certificados (NIST 1515, 1541, 1547 y 1575, BCR-60, BC-62 y V-1). Los límites

de detección para los elementos determinados son: 0,1% para K y Ca; 0,01% para Fe y Ti; 1 mg kg⁻¹ para Ga y Rb; 1,5 mg kg⁻¹ para Sr; 2 mg kg⁻¹ para Br; 2,5 mg kg⁻¹ para Y; 5 mg kg⁻¹ para Zr.

RESULTADOS

Concentraciones medias

En la Tabla 3 se muestran las concentraciones medias de los 10 elementos analizados para ambos suelos tanto en la tierra fina como en la fracción limo+arcilla. En Pena Cebral (PC) el orden de abundancia es K>Fe>Ti>Zr>Rb>Sr,Y>Ga>Br para ambas fracciones, en Curro Vello II (CVII) es K>Fe>Ca>Ti>Br>Zr>Rb>Sr>Y>Ga para la TF y Fe>K>Ti>Ca>Br>Zr>Rb>Sr>Ga>Y para la fracción LA.

Los elementos mayores, K, Ca, Ti y Fe, presentan concentraciones medias entre 0,15 y 3,8%. En PC el K varía entre el 3,1% de la TF y el 3,8% de la fracción LA, en CVII la concentración es mayor en la TF (2,2% frente al 1,5% del LA). El Fe posee en ambos suelos valores medios en torno al 2% para la TF y alrededor del 3% para la fracción LA. El Ca (en concentraciones por debajo del límite de detección en PC) y el Ti muestran conteni-

Tabla 3. Concentraciones medias y desviación estándar (entre paréntesis) para K, Ca, Ti, Fe, Ga, Rb, Sr, Y, Zr y Br por perfil en la tierra fina (TF, <2 mm) y en la fracción limo+arcilla (LA, <50 µm).

	PC		CVII	
	TF	LA	TF	LA
K	3,1 (0,49)	3,8 (0,64)	2,2 (0,57)	1,5 (0,23)
Ca	-	-	0,19 (0,03)	0,15 (0,04)
Ti	0,43 (0,04)	0,56 (0,05)	0,18 (0,05)	0,27 (0,08)
Fe	2,3 (0,54)	3,0 (0,92)	1,9 (0,60)	3,3 (1,1)
Ga	14,9 (1,9)	22,9 (2,3)	16,2 (2,8)	23,0 (5,5)
Rb	115,5 (15,0)	179,0 (12,4)	108,4 (13,1)	112,6 (20,4)
Sr	30,7 (5,8)	47,3 (6,4)	46,1 (3,1)	34,4 (3,8)
Y	31,0 (6,2)	42,8 (8,3)	22,2 (9,9)	21,4 (3,7)
Zr	443,1 (76,5)	552,5 (161,7)	126,1 (32,0)	160,3 (24,0)
Br	9,8 (6,7)	19,2 (13,4)	144,9 (86,5)	296,8 (150,4)

dos más bajos, sobre un 0,20% en CVII y un 0,40% en PC en la TF, y mientras que para el Ca la concentración disminuye ligeramente en la fracción LA (0,15%), para el Ti los valores son superiores (0,56% en PC y 0,27% en CVII).

Ga, Rb, Sr, Y, Zr y Br, tienen concentraciones medias inferiores a 600 mg kg⁻¹, siendo el Zr en PC el que alcanza los valores más altos (443,1 mg kg⁻¹ en la TF y 552,5 mg kg⁻¹ en la fracción LA), descendiendo en CVII hasta concentraciones en torno a los 125 mg kg⁻¹ de la TF y los 160 mg kg⁻¹ de la fracción LA. Para el Rb, excepto en el caso de la fracción LA de PC (que alcanza los 179 mg kg⁻¹), los valores se encuentran alrededor de los 100 mg kg⁻¹; Sr, Y y Ga son los elementos minoritarios (con concentraciones entre 15 y 50 mg kg⁻¹). Cabe destacar la diferencia de concentración de Br entre los dos suelos: mientras que en PC es el elemento en menor abundancia (entre 10 y 20 mg kg⁻¹ según se trate de la TF o de la fracción LA), en CVII alcanza los 300 mg kg⁻¹ en el LA.

En Pena Cebral todos los elementos analizados presentan una concentración más elevada en la fracción LA que en la TF, mientras que en Curro Vello II Ti, Fe, Ga, Zr y Br tienen una concentración mayor, K, Ca y Sr menor y Rb e Y similar en la fracción LA respecto a la TF.

Al comparar ambos perfiles se observa que en la tierra fina Zr, Ti, K, Y y Fe presentan concentraciones más elevadas en PC, Ga y Rb muestran valores similares en los dos suelos y Sr y Br aparecen en mayor concentración en CVII. En el caso de la fracción limo+arcilla Zr, Ti, K, Y, Rb y Sr son los que en PC tienen concentraciones superiores, para Fe y Ga los valores son similares y sólo el Br presenta un contenido mayor en CVII.

Perfiles de concentración

Los perfiles de variación de la concentración de cada elemento tanto en la TF como en la fracción LA, se muestran en la Figura 2.

Para cada suelo se pueden establecer varios grupos de elementos que poseen una distribución semejante. Así, en Pena Cebral K, Rb y Sr presentan contenidos casi constantes hasta la base del horizonte 4A, a partir del cual la concentración aumenta manteniéndose estable con la profundidad. Ti, Ga, Y y Zr presentan una concentración relativamente constante a lo largo del perfil, destacando sólo algunos valores puntuales más elevados en la fracción LA en los dos últimos elementos. Fe y Br presentan un patrón similar con máximos de concentración, especialmente en la fracción LA, en los horizontes espódicos 3Bs y 5Bhs, en este último de mayor importancia (hasta un 6% para el Fe y 57.8 mg kg⁻¹ para el Br).

En Curro Vello II K y Ca muestran valores constantes en el primer ciclo que se incrementan a lo largo del horizonte 2A; en los ciclos III y IV la concentración disminuye, aunque para el Ca lo hace de forma más acusada en la fracción LA. Cabe señalar que el K en la fracción LA presenta un comportamiento algo diferente al mantenerse estable en profundidad a lo largo de todo el perfil. En el caso de Ti, Fe y Ga se observa un incremento en la concentración a partir del ciclo II, pronunciado en la fracción LA (hasta alcanzar valores de 4.9% para el Fe, 0.40% para el Ti y 36 mg kg⁻¹ para el Ga), con una tendencia a disminuir en el ciclo IV, más evidente para Ti y Ga. Rb, Sr, Y y Zr presentan un perfil de concentración con escasas variaciones en profundidad, únicamente en el caso del Rb se aprecian ligeros incrementos, en ambas fracciones, en el ciclo I y en la transición entre los ciclos II y III. La concentración de Br -con valores del orden de 10 veces los de PC- tiende a aumentar desde la mitad del ciclo I hasta alcanzar su valor máximo en el horizonte 4Bhs (hasta 602.5 mg kg⁻¹ en la fracción LA), aunque también es destacable el incremento en esta fracción en la mitad superior del ciclo II mientras que en la TF se mantiene relativamente constante.

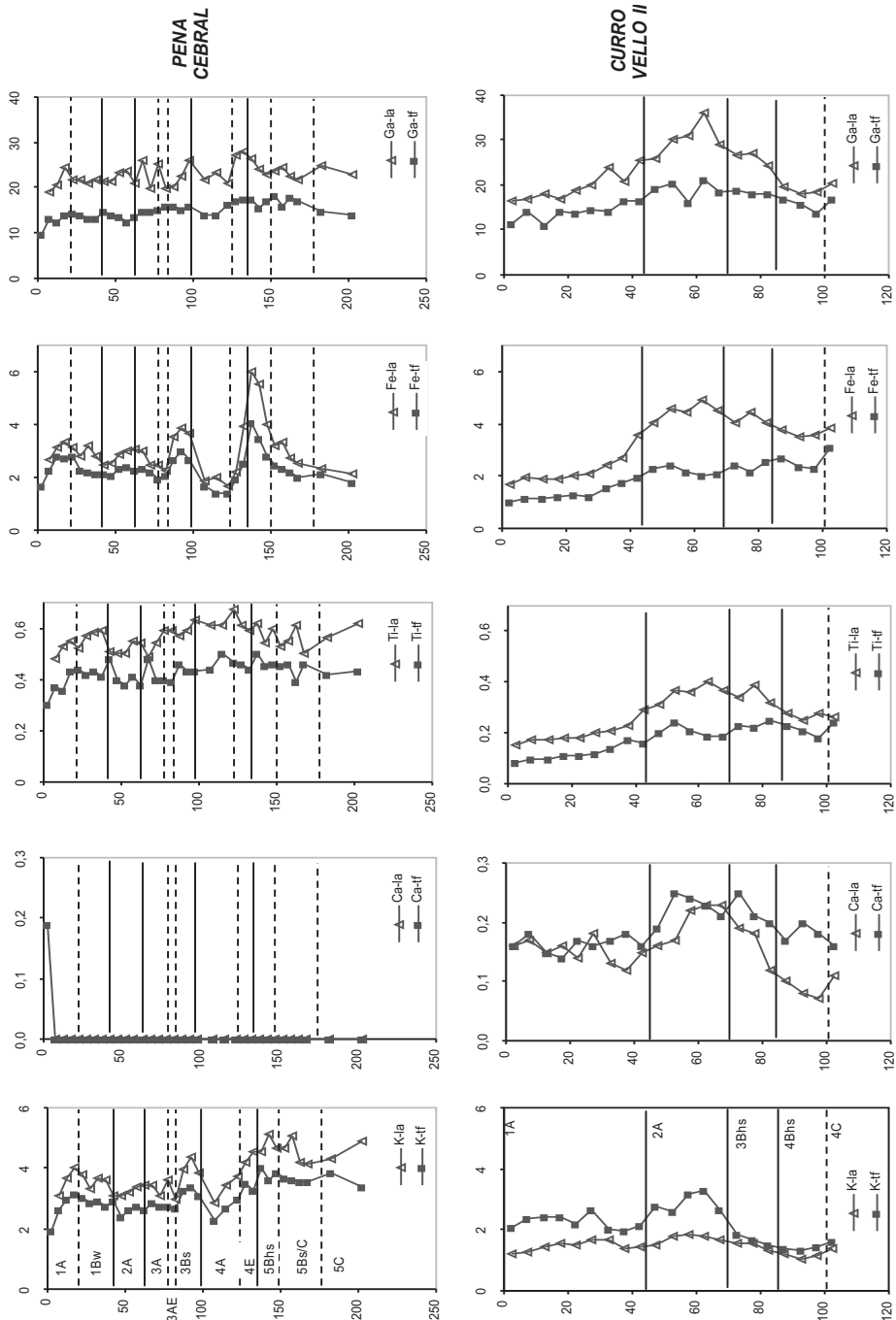


Figura 2. Perfiles de variación de la concentración con la profundidad en la tierra fina (tf) y en la fracción limo+arcilla (la) para K, Ca, Ti y Fe (en %) y Ga, Rb, Sr, Y, Zr y Br (en mg kg⁻¹) en Pena Cebрал (PC) y Curro Vello II (CVII).

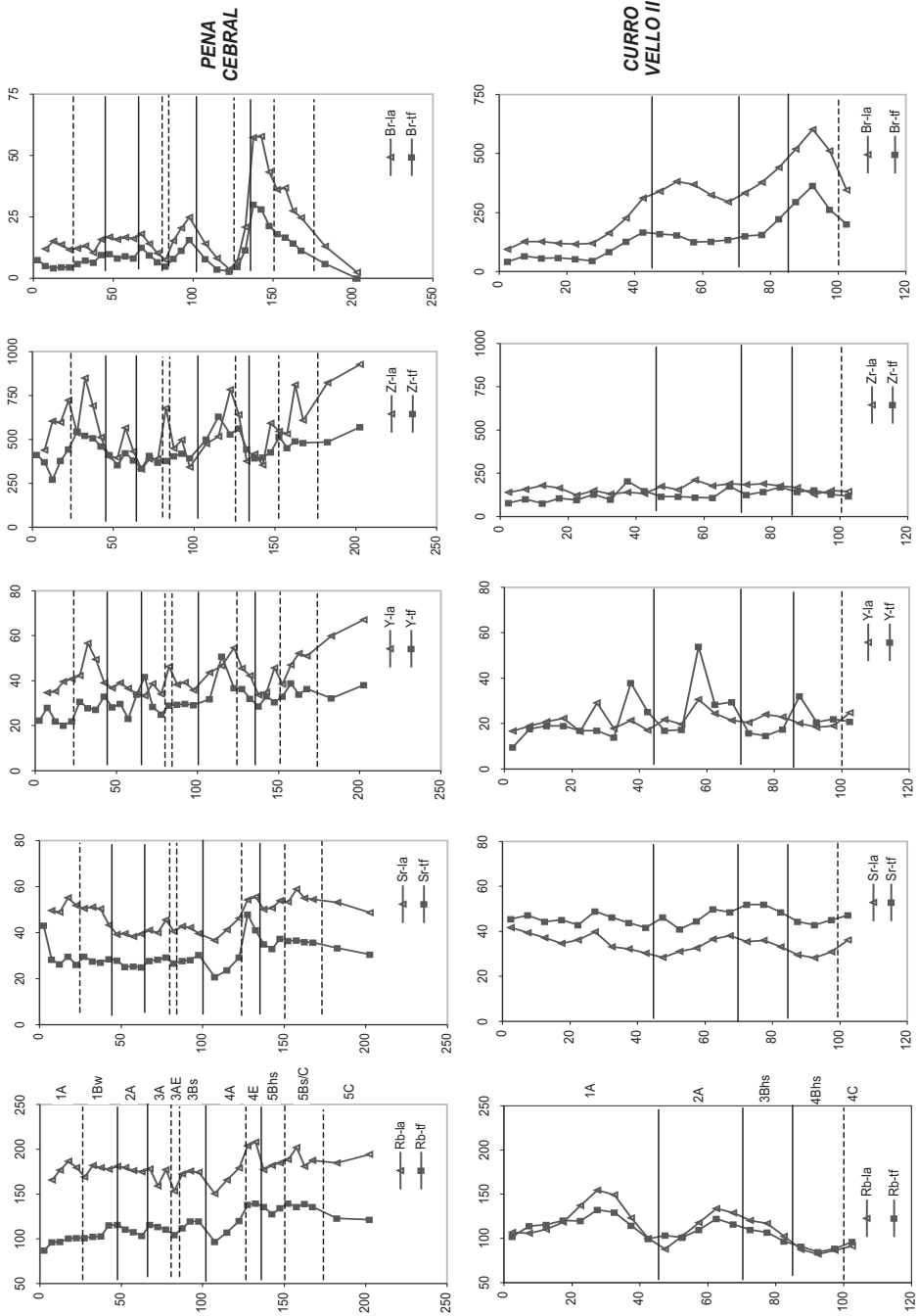


Figura 2 (continuación). Perfiles de variación de la concentración con la profundidad en la tierra fina (tf) y en la fracción limo+arcilla (la) para K, Ca, Ti y Fe (en %) y Ga, Rb, Sr, Y, Zr y Br (en mg kg⁻¹) en Pena Cebral (PC) y Curro Vello II (CVII).

Fraccionamiento físico-químico de los elementos

La determinación del contenido de distintos elementos químicos en las diferentes fracciones granulométricas de la fase sólida de los suelos, un método ya empleado en otros estudios (Schütz y Rahn, 1982; Berrow *et al.*, 1991; Buurman *et al.*, 2002), puede proporcionar información adicional sobre los procesos de meteorización y edafogénesis. Aunque existen diversas metodologías para establecer comparaciones entre las fracciones, aquí se ha decidido realizar dos aproximaciones sencillas. Se ha calculado la relación entre las concentraciones de los elementos en la fracción LA y en la fracción arena (RC) y, de forma complementaria, se ha calculado la contribución de las fracciones finas (limo+arcilla) al total de cada elemento en la tierra fina (P_{LA}):

$$RC = [LA]/[AR];$$

$$\text{donde } [AR] = ([TF] - a[LA]) / (1 - a)$$

$$P_{LA} = ((a[LA]) / [TF]) 100$$

representando [LA], [AR] y [TF] la concentración de cada elemento en la fracción limo+arcilla, arena y tierra fina respectivamente, y "a" la proporción de limo+arcilla en la tierra fina (en g g⁻¹).

Durante la meteorización el suelo tiende a perder aquellos elementos que son más móviles bajo las condiciones geoquímicas dominantes disminuyendo su concentración, mientras que la de los elementos poco móviles aumentará progresivamente a medida que avanzan la meteorización y la edafogénesis. Ambas relaciones se pueden tomar pues como índices del grado de evolución de la fase sólida en cada suelo. Las dos estarán estrechamente relacionadas si no hay grandes cambios en la granulometría entre los horizontes. Sin embargo, para una correcta comparación entre suelos de mineralogía y granulometría diferentes, como ocurre con PC y CVII, es necesario corregir la concentración

con la proporción en el suelo de cada una de las fracciones consideradas.

Como ya se ha visto, para la mayoría de los elementos determinados la concentración en la fracción LA es superior a la obtenida para la TF. Dado que esta última engloba las fracciones limo, arcilla y arena (Ar), se deduce que la concentración de los elementos en la arena ha de ser menor. La relación RC ha sido calculada para todos los elementos excepto para el Br, ya que su concentración en la arena está por debajo del límite de detección (datos no mostrados aquí). Los valores medios para cada suelo se representan en la Figura 3a. Atendiendo a estas medias, en PC se obtienen relaciones iguales o superiores a 4 para Ga, Rb y Sr, entre 2 y 3 para Y, Zr y Ti, y del orden de 1,7 para el K; en CVII Fe y Ti presentan una RC igual o superior a 2, Zr, Ga e Y entre 1 y 2, Rb en torno a 1, y para Sr, Ca y K la RC es inferior a la unidad.

Asimismo en la Figura 3b aparecen los valores medios por suelo de la proporción de cada elemento en la fracción LA (P_{LA}). Como puede observarse, en el caso de PC más de la mitad del contenido de todos los elementos está en las fracciones finas del suelo mientras que en CVII esto sólo sucede con el Fe, el Ti y el Br.

Factores de enriquecimiento

Para algunos elementos se han calculado factores de enriquecimiento (EF; Rahn, 1976), usando como elemento conservativo el Ga. Este elemento es el único de los determinados que presenta para los dos suelos un rango de concentraciones muy similar en la tierra fina y en el limo+arcilla (datos no mostrados aquí). Además, el Ga tiene un comportamiento muy similar al Al, y éste último ha sido extensivamente utilizado para el cálculo de factores de enriquecimiento (véase por ejemplo Rahn, 1976).

En la Figura 4 se han representado los factores de enriquecimiento obtenidos para

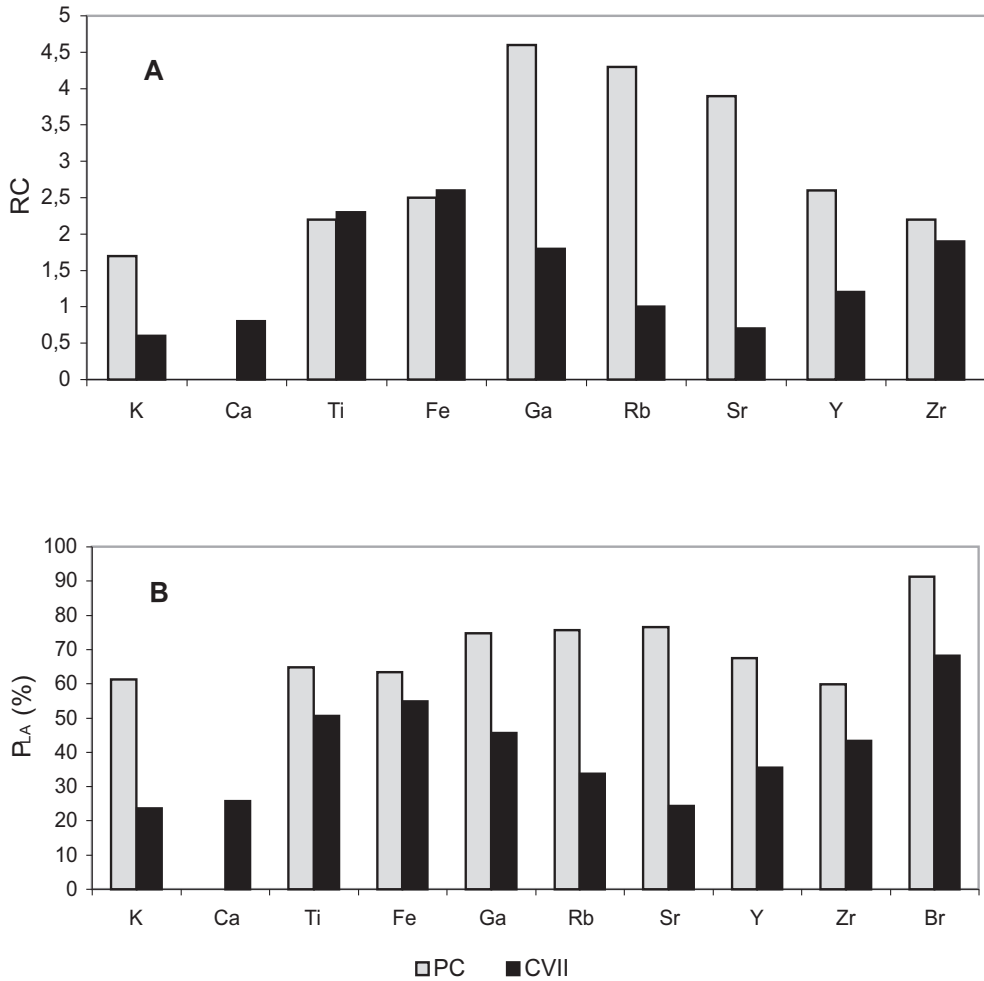


Figura 3. Valores medios por perfil para Pena Cebal (PC) y Curro Vello II (CVII) de A) la relación de concentraciones entre la fracción limo+arcilla y arena (RC) y B) la proporción de cada elemento en la fracción limo+arcilla (PLA).

Fe y Ti, normalizando a las relaciones Fe/Ga y Ti/Ga de la corteza continental superior (obtenidas de Wedepohl, 1995). También se incluye en esta figura las relaciones entre el Br en los suelos y la concentración de Br dada por Wedepohl (1995) para la corteza continental superior. En ellas puede verse que

el Br está fuertemente enriquecido en los horizontes espódicos de ambos suelos, y que el Fe lo está en los de PC. En CVII, la fracción TF muestra un ligero enriquecimiento de Fe y Ti en la base del horizonte 2A y en los horizontes espódicos (3Bhs, 4Bhs).

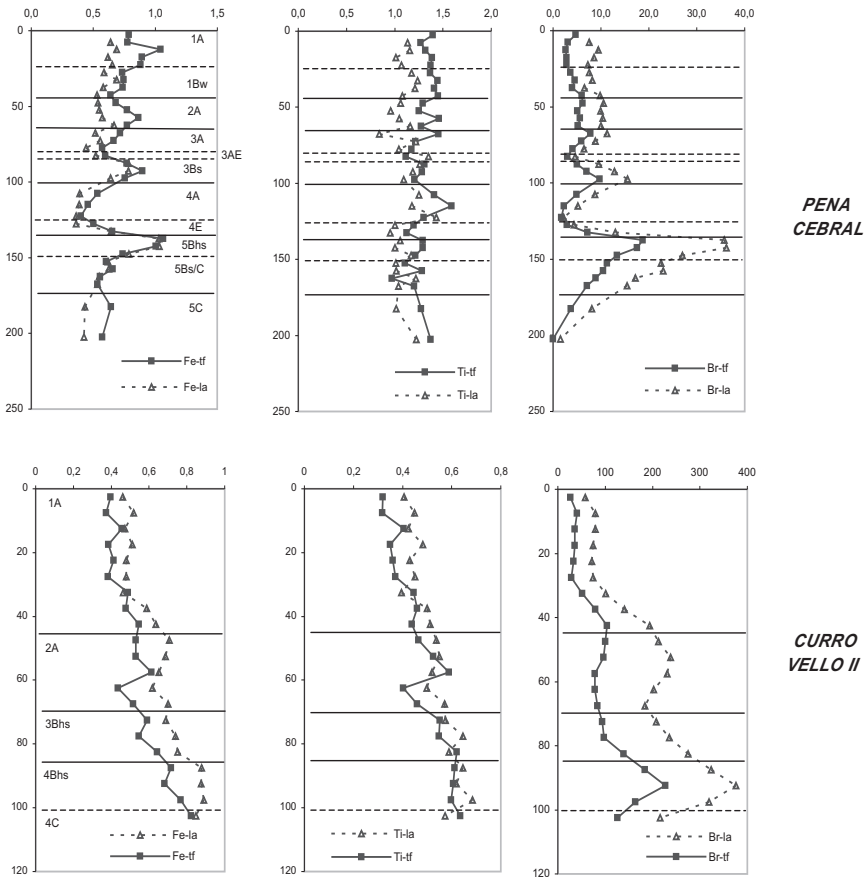


Figura 4. Factores de enriquecimiento para Fe, Ti y Br en los suelos de Pena Cebral (PC) y Curro Vello II (CVII) en la tierra fina (tf) y la fracción limo+arcilla (la), calculados empleando el Ga como elemento conservativo para Fe y Ti y normalizando a las relaciones Fe/Ga, Ti/Ga de la corteza continental superior (Wedepohl, 1995). Los factores de enriquecimiento del Br se han obtenido dividiendo la concentración observada en el suelo por la dada por Wedepohl (1995).

DISCUSIÓN

Comparación de las concentraciones obtenidas (TF) con las de otros estudios

En primer lugar debemos señalar que si bien los elementos mayores han recibido amplia atención en las investigaciones edafológicas, no son muy abundantes los trabajos dedicados al estudio de la distribución de elementos traza en rocas y suelos de Galicia.

Aunque en diversos trabajos se han analizado los contenidos de metales pesados de interés ambiental (Cu, Cr, Ni, Pb, Zn y Cd) en rocas y suelos de Galicia (Macías et al., 1993), el estudio más extenso es el realizado por Guitián Ojea *et al.* (1992) en la elaboración del Atlas Geoquímico de Galicia, y que será de obligada referencia aquí para los contenidos en materiales de partida (horizontes C) de los suelos del noroeste peninsular. No obstante,

te, incluso en dicha obra no se aportan datos para el Y y el Br. En la Tabla 4 se ha sintetizado la comparación entre las concentraciones encontradas en PC y CVII para los elementos analizados en este estudio y las dadas para horizontes C de suelos de Galicia (Guitián Ojea *et al.*, 1992), así como para rocas (ácidas y metamórficas) y suelos de otras áreas. Aún con las reservas que impone la resolución espacial del estudio de Guitián Ojea *et al.* (1992), parece oportuno señalar que los dos suelos presentan concentraciones mucho más bajas de Ca y Sr, y concentraciones más elevadas de Fe en el caso de CVII y de Zr en PC que las dadas para los materiales

de partida de sus entornos. No obstante, como se comentará más adelante, en el caso del Fe los valores máximos tan elevados se deben al proceso de podsolización. El Ti, el Ga y el Rb parecen estar en concentraciones similares a las de las rocas del área.

En esta misma tabla, además de los valores máximos y mínimos para la tierra fina se indican también los resultados para la fracción limo+arcilla, donde se observa que la mayoría de los elementos -sobre todo los menos móviles- aparecen en concentraciones más elevadas, hecho que coincide con los resultados obtenidos en estudios anteriores (Schütz & Rahn, 1982).

Tabla 4. Valores de referencia para rocas de Galicia, y rocas y suelos de otras áreas, así como rangos de las concentraciones encontradas para los elementos analizados en este estudio (fracción tierra fina, < 2mm, y fracción limo+arcilla, < 50 mm). Los elementos mayores (K,Ca, Ti y Fe) están expresados en porcentaje; los elementos traza (Ga, Br, Rb, Sr, Y, Zr) en mg kg⁻¹.

	Galicia ¹		Pena Cebra ²		Curro Vello II ²		Otros estudios
	Xistral	Ancares	< 2 mm	<50 mm	< 2 mm	<50 mm	
K	1-3	1-3	1.9-4.0	2.9-5.1	1.3-3.3	1.0-1.8	
Ca	< 0.7	0.7-1.8	< 0.1-0.2	< 0.1	0.14-0.25	0.1-0.23	
Ti	0.1-0.25	0.4-0.5	0.3-0.5	0.5-0.7	0.10-0.25	0.17-0.40	0.12-0.34 rocas ácidas ³ 0.44-0.46 roca metamf. ³
Fe	< 0.5	5-7.5	1.4-4.1	1.7-6.0	1.1-3.1	1.9-4.9	1.4-2.7 rocas ácidas ⁴ 4.3-4.8 rocas metamf. ⁴
Ga	10-20	> 20	10-18	19-28	11-21	17-36	20 rocas ácidas ⁵ 30 rocas metamf. ⁵
Br	-	-	3-30	3-58	45-363	115-602	5-40 suelos ^{3,4}
Rb	100-150	100-150	87-140	151-208	85-132	82-154	100-200 ^{3,4}
Sr	50-100	50-200	21-48	37-59	41-52	28-42	60-300 rocas ácidas ⁴ 300 rocas metamf. ⁴
Y	-	-	20-51	33-67	14-54	17-31	10-150 suelos ⁴
Zr	100-200	200-400	271-630	329-926	76-205	124-212	200-400 suelos r. ácidas ⁴ 150-200 suelos r. metamf. ⁴

1. Guitián Ojea *et al* (1992), 2. este estudio, 3. Aller *et al.* (1989), 4. Kabata-Pendias *et al.* (1992), 5. Aubert *et al.* (1977)

Distribución vertical y fraccionamiento de los elementos en los suelos

La distribución vertical y las diferencias en las concentraciones de los elementos entre las fracciones granulométricas responden al control ejercido por, al menos, cuatro factores principales: la herencia que imprime el material de partida, la meteorización y la edafogénesis (el ambiente geoquímico), los procesos morfogenéticos y la deposición atmosférica.

La herencia del material de partida.

Este factor se expresa inicialmente a través de la composición mineralógica del material de partida. Así, las concentraciones medias de los elementos en la TF siguen una distribución acorde con la naturaleza litológica de cada suelo. Los valores más elevados de Zr e Y en PC se relacionan con el mayor contenido de micas en este suelo; estas últimas también condicionarían que los contenidos de K, Ti y Fe sean mayores que los de CVII. Por el contrario el Sr, que se encuentra fundamentalmente asociado a los feldespatos, aparece en mayor concentración en CVII, mientras que Ga y Rb, presentes tanto en micas como en feldespatos, muestran valores similares en ambos suelos.

El segundo aspecto importante en relación al material de partida es el tamaño de grano dominante. Como se ha mencionado con anterioridad, el suelo de PC se ha desarrollado a partir de materiales metamórficos (pizarras, filitas, esquistos y cuarcitas) que tienen tamaño de grano fino, mientras que el de CVII lo hace a partir de materiales plutónicos con tamaño de grano grueso. Esto queda reflejado de forma clara en el hecho de que en PC los limos y las arcillas contienen más de la mitad del total de todos los elementos en la tierra fina, mientras que en CVII esto sólo ocurre para los elementos inmóviles: Ti, Fe, Ga, Y y Zr. Hecho que debe además entenderse en el sentido de que el grado de herencia mineralógica en las fracciones finas de PC es mucho mayor que en CVII. En este último, las

fracciones finas parecen estar dominadas por los productos de neoformación, lo que justificaría su bajo contenido en K, Ca y Sr. Esto es coherente con la mineralogía de la arcilla de ambos suelos: predominio de micas escasamente evolucionadas e interestratificadas mica-vermiculita en PC y predominio de los filosilicatos 1:1 y gibbsita en CVII.

El ambiente geoquímico: meteorización y edafogénesis

En conjunto, al comparar ambos suelos, se observa un menor grado de evolución geoquímica en PC que en CVII, en consonancia con la mineralogía de la arcilla descrita por Moares Domínguez (1997). Tanto los resultados obtenidos para la relación RC como los correspondientes a la P_{LA} (Figuras 3a y 3b) sugieren una meteorización más intensa en CVII que en PC. También es destacable que la evolución geoquímica de CVII no se corresponde con la escasa a moderada evolución morfológica del suelo, por lo que muy probablemente el material de partida de los ciclos actuales se haya visto sometido a etapas anteriores de intensa meteorización química, que podrían haber ocurrido incluso durante el Terciario -bajo condiciones climáticas más cálidas y húmedas-.

Por otra parte, en el contenido de un elemento en el suelo además de la composición mineralógica del material de partida, influyen el grado de alterabilidad de los minerales en los que esté presente y su mayor o menor movilidad. Por ejemplo, Ca y K son elementos móviles que tienden a perderse a medida que el suelo evoluciona; las pérdidas de Ca son más elevadas debido a la fácil alteración de las plagioclasas, mientras que el lavado de K es menos intenso al ser los feldespatos potásicos minerales menos susceptibles a la meteorización y al ser retenido este elemento en las micas y sus productos de degradación. Como ya se ha mencionado, en PC las concentraciones de Ca están por debajo de límite de detección -aunque esto podría deberse a la

pobreza del propio material de partida, mientras que en CVII la relación RC media para el Ca en los horizontes basales (4C, 4Bhs) está entre 0.3-0.5, lo que indica pérdidas intensas. Lo mismo ocurre para el Sr y el K en CVII, donde las RC mínimas se dan también en los horizontes basales con valores de 0.5-0.6 y 0.7, respectivamente.

El Rb, aún siendo un elemento móvil, tiene relaciones RC en torno a 1. Esto sugiere que en CVII su movilidad relativa es menor a la de Ca, Sr y K. A pesar de ello, la mayor parte del Rb, Ca, Sr y K del suelo están en las fracciones gruesas, tal como sugieren los valores inferiores al 50% de la P_{LA} para estos elementos (Figura 3b). Lo mismo podría decirse del Y, con relaciones RC del orden de 1 y proporciones P_{LA} entre 61-21%.

Por lo que respecta a PC, todos los elementos tienen relaciones RC superiores a 1 y valores de P_{LA} mayores del 50% en todos los horizontes, probablemente debido a la elevada proporción de limos en las fracciones finas (LA) y la escasa evolución mineralógica del suelo.

En resumen, los resultados obtenidos para la relación RC en CVII ponen de manifiesto una mayor movilidad de K, Ca y Sr (los únicos que presentan valores de la relación inferiores a la unidad o en torno a ella), aunque la menor concentración del Sr en la fracción LA podría relacionarse también con el hecho de que se trata de un elemento procedente de los feldespatos, minerales más resistentes a la meteorización que las plagioclasas, por lo que sus concentraciones más elevadas se encontrarán en las arenas, como ha sido puesto de manifiesto por Berrow *et al.* (1991). En PC, sin embargo, todos los elementos, incluso los anteriores, aparecen en mayor concentración en la fracción LA (lo que se refleja en valores de RC siempre por encima de 1), hecho que se relaciona con el menor grado de evolución geoquímica de este suelo en comparación al de CVII.

Atendiendo a la proporción de los elementos en la fracción limo+arcilla, en PC, donde la textura es equilibrada, los resultados obtenidos (P_{LA} siempre superior al 50%) concuerdan con los vistos para RC, lo cual indica que la granulometría no es determinante en este caso. Por el contrario en CVII, con predominancia de la fracción arena, concentraciones elevadas de determinados elementos en el LA quedan enmascaradas por la baja proporción de esta fracción en la composición granulométrica, por lo que únicamente Br, Ti y Fe presentan proporciones iguales o superiores al 50%.

Hay, sin embargo, algunos elementos cuyas variaciones en profundidad no dependen tanto del grado de meteorización y de la mineralogía, sino que su distribución parece estar afectada fundamentalmente por el proceso edafogenético dominante, en este caso la podsolización. Debemos recordar, no obstante, que aunque ambos suelos han sido caracterizados como suelos podsólicos, presentan una morfología muy distinta. En consecuencia, en PC la distribución vertical del Fe en los ciclos podsólicos (III y IV-V) es la que cabría esperar para podsoles típicos, con fuertes acumulaciones en los horizontes espódicos -como refleja el incremento en los mismos del factor de enriquecimiento- especialmente en el más profundo, que por ser el de mayor antigüedad habría desarrollado el proceso de manera más intensa. Por el contrario, aunque CVII también ha sido caracterizado en trabajos previos como un suelo podsólico, no existen evidencias de acumulación importante de Fe en los horizontes espódicos, pero sí de Al (Moares Domínguez, 1997).

Otro elemento que se ve fuertemente influido por el proceso de podsolización es el Br, cuyos máximos de concentración aparecen en ambos suelos en los horizontes espódicos, superando incluso los contenidos de los horizontes A (como puede observarse en la Figura 4). De todos los suelos que hemos estudiado por el momento, esto sólo sucede

en los podsoles y suelos podsólicos. Diversos estudios han puesto de manifiesto la halogenación de la materia orgánica durante el proceso de descomposición (Myneni, 2002; Keppler *et al.*, 2002), y trabajos recientes han demostrado la existencia de un proceso abiótico de halogenación en presencia de Fe (Keppler *et al.*, 2000). Así pues, cabe la posibilidad de que determinados compuestos orgánicos fijen el Br en la superficie del suelo y luego sean redistribuidos en profundidad en condiciones podsolizantes, si bien no se puede descartar que este elemento sea también fijado directamente por la materia orgánica del propio horizonte espódico a partir del Br en disolución en el agua de lluvia que atraviesa el suelo.

En PC, donde la podsolización es evidente, se observa que efectivamente el Br se acumula en aquellos horizontes con mayor presencia de compuestos organometálicos (3Bs y 5Bhs), por lo cual este elemento podría considerarse un buen indicador del proceso de podsolización cuando aparece acumulado en horizontes subsuperficiales. De hecho, aunque en el perfil de CVII el proceso no se ha desarrollado de forma tan intensa, se observa igualmente una acumulación de Br en los horizontes espódicos (3Bhs y 4Bhs) e incluso en el 2A, donde la podsolización es sólo incipiente. Además, en ambos suelos la concentración de Br presenta correlaciones altamente significativas con las formas extraídas de Al: coeficientes de correlación de 0.94-0.95 en CVII y de 0.81-0.92 en PC (Figura 5a). La correlación con las formas de Fe extraído es menor (Figura 5b), e incluso poco significativa para el Fe extraído en ditionito (Fe libre total). Lo cual apoya la interpretación de un transporte de Br en los complejos orgánicos móviles. Además de su incorporación directa en la materia orgánica, tampoco se puede descartar un papel del Al, como elemento polivalente, en la fijación de Br. No obstante, en estudios realizados en turberas del área del Xistral se han encontra-

do concentraciones elevadas de Br (de hasta 350 mg kg⁻¹) en turbas con proporciones extraordinariamente bajas de formas extraíbles de Fe y Al, por lo que el mecanismo de halogenación de la materia orgánica parece ser el dominante en la fijación de este elemento (datos no mostrados).

En suelos podsólicos se ha descrito la movilización de Ti y Ga junto al Fe y a la materia orgánica (Aubert *et al.*, 1977; Kabata-Pendias *et al.*, 1992). Sin embargo en PC, donde el proceso de podsolización está claramente definido, el Ti y el Ga parecen comportarse como elementos conservativos y apenas muestran variaciones en el perfil; mientras que en CVII ambos presentan un aumento ligero de la concentración en la TF del horizonte 2A (como puede observarse para los factores de enriquecimiento del Ti). En este suelo, además, el Ti presenta correlaciones significativas con las formas de Fe y Al extraídas en oxalato y pirofosfato ($r=0.74-0.82$) y altamente significativas con el Fe total ($r=0.96$); esto podría deberse a una ligera movilización del Ti en el proceso de podsolización, aunque no es descartable que también pueda deberse a la adsorción del mismo a los óxidos de Fe. El Ga no obstante, tiene concentraciones muy semejantes en los dos suelos y un escaso fraccionamiento, no existiendo evidencias de movilización.

Finalmente, Zr e Y aparecen concentrados en los horizontes eluviales (3AE y 4E), tal como correspondería a elementos hospedados en minerales muy resistentes a la meteorización (zircones).

En síntesis, mientras que en PC la podsolización es evidente en al menos los dos ciclos más antiguos del suelo, CVII presenta algunas características típicas de suelos podsólicos mientras que otras o están escasamente expresadas o no lo están en absoluto. Este aspecto ya se ha reconocido en este tipo de suelos en otros trabajos (Macías, 1980). Las diferencias podrían ser atribuidas a la natura-

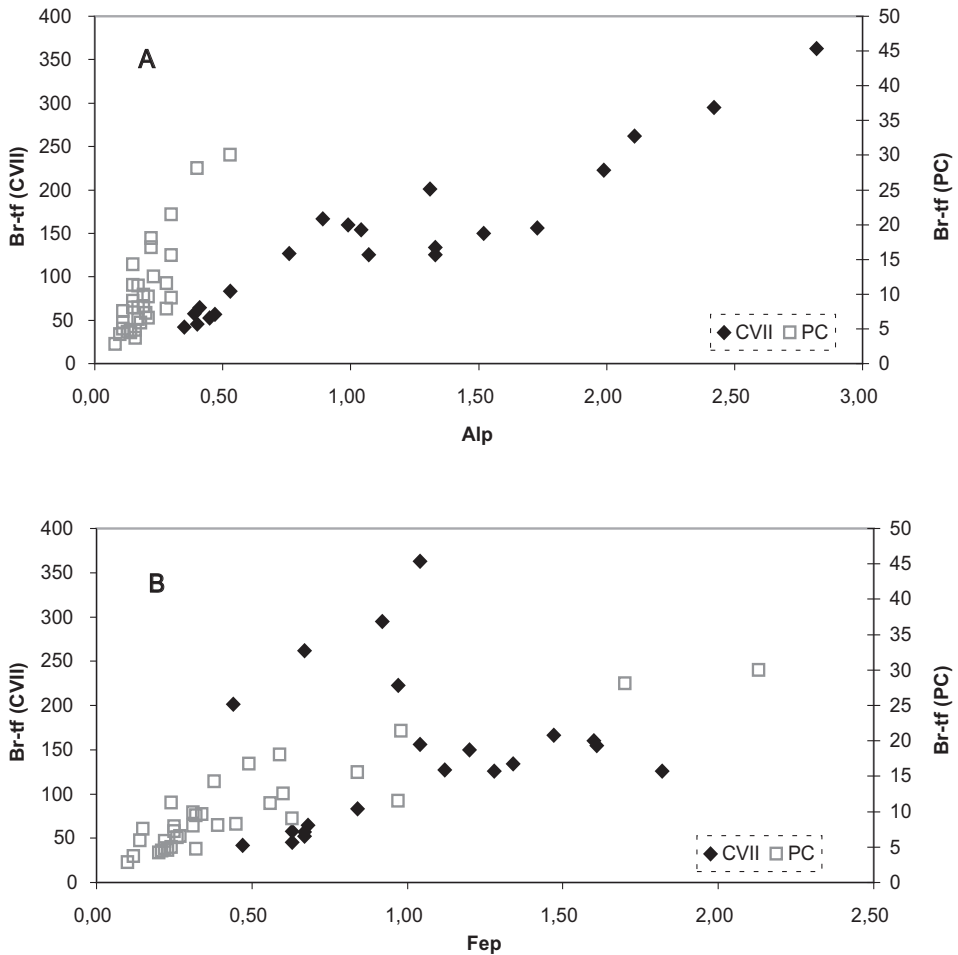


Figura 5. Correlación entre la concentración de Br en la tierra fina (Br-tf) y A) el aluminio extraído en pirofosfato (Alp), y B) el hierro extraído en pirofosfato (Fep), para los suelos de Pena Cebral (PC) y Curro Vello II (CVII).

leza del material de partida; así, en rocas pobres en bases, Fe y Al, como las cuarcitas en el caso de PC, este proceso se ve favorecido de forma permanente. Por el contrario, otros materiales más ricos en Fe como las granodioritas, que sirven de material de partida en CVII, necesitarán condiciones climáticas muy frías para el desarrollo de la podsolización; la cual se verá ralentizada en épocas de temperatura más elevada, en las cuales

debido al aumento de la meteorización la tendencia será preferentemente hacia la formación de cambisoles. Obsérvese que incluso en PC el disparo de la podsolización parece estar relacionado con la formación de coluvios cuarcíticos.

También es oportuno mencionar aquí que en algunos estudios se ha aprovechado el comportamiento conservativo del Ti para emplearlo como elemento de referencia en el

cálculo de factores de enriquecimiento (Blaser *et al.*, 2000; Martínez Cortizas *et al.*, 2000; Franco Maside *et al.*, 2000; Shotyk *et al.*, 2000; Marcel Görres *et al.*, 1997; Kempter *et al.*, 1997). Sin embargo en los dos suelos estudiados tan sólo en PC parece comportarse como un elemento conservativo, mientras que en CVII podría estar sujeto a una cierta movilización, lo que limitaría su empleo como elemento de referencia. Este resultado es similar al encontrado por Chesworth *et al.* (1998) en un estudio sobre la distribución de elementos traza en podsoles del norte peninsular.

Procesos morfogenéticos

Los procesos erosivo-sedimentarios que operan a escala de paisaje ejercen también un control sobre la concentración y distribución de los elementos en los suelos. Por un lado influyen en la redistribución de los minerales que los contienen, en función de su tamaño y densidad, intensificando el fraccionamiento puesto en marcha por la meteorización química; y por otro, contribuyen al rejuvenecimiento de los perfiles al aportar a la superficie de los suelos material fresco o con bajo grado de meteorización, cuando no un cambio drástico en la mineralogía si cambia el área fuente de los materiales. La combinación de episodios reiterados de erosión/sedimentación, además, suele acarrear el truncamiento de suelos preexistentes, con la consiguiente pérdida de parte o todos los horizontes.

Así por ejemplo, en CVII el aumento de la concentración de K en el ciclo II podría deberse a la llegada de material menos alterado, y un menor contenido de K y Ca a lo largo del primer ciclo sería debido a la deposición de un material con mayor grado de meteorización que el subyacente. Del mismo modo, en el perfil de PC concentraciones más elevadas de K, Rb y Sr en el depósito basal son acordes con la distinta naturaleza litológica del mismo (con mayor contenido en micas y feldespatos) respecto a la del coluvio superior.

Por otro lado, la fuerte irregularidad mostrada por los perfiles verticales de concentración de elementos como el Y (en PC y CVII) y el Zr (en PC) también sugiere que los procesos morfogenéticos desempeñan un papel importante en su redistribución. Por ejemplo, el Zr está presente casi de forma exclusiva en los zircones, que son minerales de tamaño de grano relativamente grande (limo) y densos, de forma que su transporte y sedimentación dependerá en gran medida de la intensidad del medio (agua, viento). En consecuencia, aquellos elementos que estén en una o unas pocas fases mineralógicas, resistentes a la meteorización y de alta densidad, serán más susceptibles de presentar fuertes discontinuidades en su concentración en suelos coluviales. En este sentido, y dado que el Zr también es utilizado habitualmente como elemento conservativo (Blaser *et al.*, 2000; Shotyk *et al.*, 2000) para el cálculo de factores de enriquecimiento debe advertirse que, al menos en los suelos coluviales, su uso sería inadecuado.

Por último, y aunque esto es bastante especulativo, la ausencia en CVII de un nivel claro de acumulación de Fe como correspondería a un suelo podsólico, también podría deberse a las contingencias evolutivas del suelo derivadas de los procesos morfogenéticos. Puesto que en medios bien drenados durante la podsolización el Fe tiende a movilizarse más lentamente que el Al (Aguilar *et al.*, 1980), si su máximo hubiera ocurrido por encima de los horizontes 3Bhs y 4Bhs actuales, el truncamiento del perfil durante un proceso erosivo –ocurrido entre hace 6.000 y 5.000 años (Martínez Cortizas, 1996; Moares Domínguez *et al.*, 1996)- podría haber eliminado dicha parte del suelo, dejando tan sólo la de acumulación de Al, ubicada a mayor profundidad. Así pues, los suelos coluviales representarían un discontinuo temporal, con hiatos que sólo podrán evaluarse mediante estudios extensivos en el área (Martínez Cortizas, 1996).

Deposición atmosférica

Por último, además de los factores ya comentados, la deposición atmosférica ha influido de forma notable en la concentración de Br en los dos suelos. En CVII las concentraciones de Br, con independencia del horizonte, son 15 veces superiores a las de PC tanto en la tierra fina como en la fracción limo+arcilla. Los océanos son la principal fuente de Br -Wedepohl (1995), por ejemplo, da un valor medio de Br de 1,6 ppm para las rocas de la corteza continental superior- por lo que el flujo de este elemento es mayor en CVII, que está ubicado en la Serra do Xistral a unos 20 km de la costa, que en PC que se encuentra en Ancares a más de 100 km del océano Atlántico.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo indican que tanto la distribución de los elementos como las diferencias de concentración entre la tierra fina y la fracción limo+arcilla de estos dos suelos están controladas principalmente por la naturaleza mineralógica del material de partida, la meteorización, la edafogénesis (proceso de podsolización), la morfogénesis -relacionada con la evolución cuaternaria de las superficies en las que se forman los suelos- y la deposición atmosférica.

El material de partida influye sobre la composición mineralógica del suelo así como sobre el tamaño de grano dominante. Por lo tanto, además de condicionar una mineralogía diferente para cada suelo -con mayor contenido de biotitas y en consecuencia concentraciones más elevadas de K, Ti, Fe, Zr e Y en Pena Cebral, y mayor cantidad de feldespatos y por lo tanto de Sr en Curro Vello II-, el origen metasedimentario del material de partida de PC da lugar a una mayor proporción de fracciones finas para este suelo. Asimismo el grado de herencia de estas fracciones finas es mayor que en Curro Vello II, donde parecen

estar dominadas por los productos de la neoformación. Cabe señalar también que la mayoría de los elementos, especialmente los menos móviles, aparecen en mayor concentración en las fracciones finas, lo que concuerda con los resultados obtenidos en otros estudios.

La meteorización afecta sobre todo a la diferencia de concentración entre las distintas fracciones granulométricas, de hecho valores más altos de RC y P_{LA}, especialmente para los elementos móviles (K, Ca, Sr), tal y como ocurre en Pena Cebral, se relacionan con un menor grado de evolución de la fase sólida. En CVII, sin embargo, aunque la evolución morfológica es escasa, valores bajos de RC y P_{LA} para estos mismos elementos nos indican un mayor grado de meteorización en este perfil.

La podsolización influye en la distribución vertical de algunos elementos en el perfil; para el Fe en Pena Cebral, por ejemplo, el perfil de concentración es el que cabría esperar en podsoles típicos, con importantes acumulaciones en los horizontes espódicos. Otro elemento que se ve afectado por el proceso de podsolización es el Br, con máximos de concentración en los horizontes Bs y Bhs (incluso en Curro Vello II donde este proceso edafogénico no es tan evidente). Su mayor presencia en horizontes subsuperficiales con contenidos elevados de compuestos organometálicos lo convierte en un buen indicador de la podsolización. Cabe señalar que en la concentración de Br ha influido de manera determinante la deposición atmosférica, presentando Curro Vello II, más cercano a la costa, contenidos del orden de 15 veces los de Pena Cebral en todo el suelo, independientemente de la fracción de la que se trate. Por lo que respecta al Ti, aunque habitualmente se considera que es un elemento conservativo y en Pena Cebral parece comportarse como tal, en determinados casos y bajo condiciones podsolizantes podría existir una ligera movilización, algo que se intuye en el perfil de

Curro Vello II, donde se dan correlaciones significativas entre el Ti y las formas de Fe y Al extraíbles (oxalato, pirofosfato).

Los procesos morfogenéticos que operan a escala de paisaje (procesos erosivo-sedimentarios) provocan la eliminación de suelo formado en épocas anteriores, así como un rejuvenecimiento del perfil por aporte de material fresco en superficie, que puede ser incluso de naturaleza litológica diferente a la del material que constituye el suelo preexistente. Además, la intensidad de estos procesos condiciona la redistribución de los minerales en función de su tamaño y densidad, pudiendo generar perfiles verticales irregulares. La concentración y el fraccionamiento de los elementos se ven influidos por todos estos mecanismos, lo cual nos da una idea de la importancia que estos fenómenos tienen en el desarrollo del suelo.

Todas estas conclusiones son coherentes con el concepto de suelo como ente complejo, en el que, como señalan diversos autores (Johnson y Watson-Stegner, 1987; Johnson *et al.*, 1990; Philips, 1993; Martínez Cortizas, 1996), el efecto simultáneo de rutas edafogénicas regresivas y progresivas implica la posibilidad de que en su evolución el suelo muestre patrones de diferenciación más complejos que el simple aumento del desarrollo con el tiempo.

AGRADECIMIENTOS. Los autores desean expresar su agradecimiento a Andrij Cheburkin (Institute of Environmental Geochemistry, Universidad de Heidelberg, Alemania) y Olena Kurtzel (Key Analytical Inc, Canadá) por los cuidadosos análisis realizados en las muestras de estos suelos; así como a Teresa Taboada y Carlota García Paz (Dept. Edafología y Química Agrícola de la USC) por las útiles discusiones mantenidas.

REFERENCIAS

- Aguilar, J., Benayas, J., Macías, F. (1980): Procesos de edafogénesis. I. Podsolización. *An. Edaf. Agrob.* 39, 1895-1922.
- Aller, A.J., Bernal, J.L., del Nozal, M.J. (1989): Geochemistry of trace elements. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. Comunicaciones INIA-Tecnología Agraria, Madrid, 38 p.
- Aubert, H. y Pinta, M. (1977): Trace elements in soils. Elsevier, Amsterdam, 395 p.
- Berrow, M.L. y Mitchell, R.L. (1991): Location of trace elements in soil profiles: total contents of particle-size separates. *Trans. Royal Soc. Edimburg: Earth Sciences* 82, 195-209.
- Blaser, P., Zimmermann, S., Luster, J., Shotyk, W. (2000): Critical examination of trace elements enrichments and depletions in soils: As, Cr, Ni, Pb and Zn in Swiss forests soils. *Science Total Environ.* 249, 257-280.
- Buurman, P., García-Rodeja, E., Martínez Cortizas, A., van Doesburg, J.D.J. (2002): Stratification in European volcanic soils studied by laser-diffraction grain-sizing and chemical analysis. *Geoderma* (en prensa).
- Cheburkin, A.K. y Shotyk, W. (1996): An energy dispersive miniprobe multielement analyzer (EMMA) for direct analysis of Pb and other trace elements in peats. *Fress. Jour. Anal. Chem.* 345, 688-691.
- Chesworth, W., García-Rodeja, E., Martínez Cortizas, A., Macías Vázquez, F. (1998): Trace elements in podzols from Northern Spain. Proceeding of the 16th International Congress of Soil Science, Montpellier, France. CD.
- Franco Maside, S., Martínez Cortizas, A., García-Rodeja, E. (2000): El mercurio como indicador geoquímico de la evolución de los suelos y del paisaje durante el Holoceno en Galicia (NW de España).

Proceeding of the Commission on the Holocene, Sevilla, 139-142.

Fujikawa, Y., Fuki, M., Kudo, A. (2000): Vertical distributions of trace elements in natural soil horizons from Japan. Part 1. Effect of soil types. *Water Air Soil Pollut.* 124, 1-21.

Görres, M. y Frenzel, B. (1997): Ash and metal concentrations in peat bogs as indicators of anthropogenic activity. *Water Air Soil Pollut.* 100, 355-365.

Gutián Ojea, F. (Coord.) (1992): Atlas geoquímico de Galicia. Consellería de Industria e Comercio, Dirección Xeral de Industria.

Johnson, D.L. y Watson-Stegner, D. (1987): Evolution model of pedogenesis. *Soil Sci.* 143, 349-366.

Johnson, D.L., Keller, E.A., Rockwell, T.K. (1990): Dynamic pedogenesis: new views on some key soil concepts and a model for interpreting Quaternary soils. *Quat. Res.* 33, 306-319.

Kabata-Pendias, A. and Pendias, H. (1992): Trace elements in Soils and Plants. CRC Press, Boca Raton, Florida, 365 p.

Kempton, H., Görres, M., Frenzel, B. (1997): Ti and Pb concentrations in rainwater-fed bogs in Europe as indicators of past anthropogenic activities. *Water Air Soil Pollut.* 100, 367-377.

Keppler, F., Eiden, R., Niedan, V., Pracht, J., Schöler H.F. (2000): Halocarbons produced by natural oxidation processes during degradation of organic matter. *Nature* 403, 298-301.

Keppler, F. y Biester, H. (2002): Peatlands a major sink of naturally formed organic chlorine. *Chemosphere* (en prensa).

Kurtz, A., Derry, L.A., Chadwick, O.A., Alfano, M.J. (2000): Refractory element mobility in volcanic soils. *Geology* 28, 683-686.

Laruelle, J. y Stoops, G. (1967): Minor elements in Galapagos soils. *Pedologie* 17, 232-258.

Macías, F. (1980): Características micro-morfológicas de podsoles y suelos podsólicos de la zona húmeda española. *An. Edaf. Agrob.* 39, 879-898.

Macías, F., Veiga Vila, A., Calvo de Anta, R. (1993): Influencia del material geológico y detección de anomalías en el contenido de metales pesados en horizontes superficiales de suelos de la Provincia de A Coruña. *Cuadernos del Laboratorio Xeolóxico de Laxe* 18, 317-323.

Martínez Cortizas, A. (1996): Evolución de los suelos durante el Cuaternario reciente en las Sierras Septentrionales de Galicia (NW España) en <<Avances en la Reconstrucción Paleoambiental de las Áreas de Montaña Lucenses>>, A. Pérez Alberti y A. Martínez Cortizas (Eds.). Diputación Provincial de Lugo, 137-161.

Martínez Cortizas, A. y Pérez Alberti, A. (1999) (Coord.). Atlas climático de Galicia. Xunta de Galicia.

Martínez Cortizas, A., Fábregas Valcarce, R., Franco Maside, S. (2000): Evolución del paisaje y actividad humana en el área de Monte Penide (Redondela, Pontevedra): una aproximación metodológica. *Trabajos de Prehistoria* 57, 173-184.

Myneni, S.C. (2002): Formation of stable chlorinated hydrocarbons in weathering plant material. *Science* 295, 1039-1041.

Moares Domínguez, C., Taboada Rodríguez, T., García-Rodeja, E., Martínez Cortizas, A. (1996): Tendencias de la podsolización durante el Cuaternario reciente en áreas de montaña en <<Avances en la Reconstrucción Paleoambiental de las Áreas de Montaña Lucenses>>, A. Pérez Alberti y A. Martínez Cortizas (Eds.). Diputación Provincial de Lugo, 121-135.

Moares Domínguez, C. (1997): Suelos policíclicos y su importancia en el estudio de la evolución edáfica en el NW peninsular, PhD thesis, Facultad de Biología, Universidad de Santiago de Compostela.

Philips, J. (1993): Progressive and regressive pedogenesis and complex soil evolution. *Quat. Res.* 40, 169-176.

Rahn, K. (1976): The chemical composition of the atmospheric aerosol. Tech. Rep. Graduate School of Rhode Island, University of Rhode Island, 265 pp.

Rose, A.W.; Hawkes, H.E.; Web, J.S. (1979): Geochemistry in mineral exploration. 2nd Edition, Academic Press Inc., London, 657 p.

Schütz, L. y Rahn, KA. (1982): Trace-element concentrations in erodible soils. *Atmos. Environ.* 16, 171-176.

Shotyk, W., Blaser, P., Grünig, A., Cheburkin, A.K. (2000): A new approach for quantifying cumulative, anthropogenic, atmospheric lead deposition using peat bog profiles. *Science Total Environ.* 249, 281-295.

Wedepohl, K. (1995): The composition of the continental crust. *Geochim. Cosmochim. Acta* 59, 1217-1232.

Weiss, D., Shotyk, W., Cheburkin, A. (1998): Determination of Pb in ashed peat plants using a energy-dispersive miniprobe multi-element analyzer (EMMA). *Analyst* 123, 2097-2102.

DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS METÁLICOS (Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Pb, Th) Y ARSÉNICO EN DOS SUELOS POLICÍCLICOS PODSÓLICOS

R. PIÑEIRO REBOLO, E. PEITEADO VARELA Y A. MARTÍNEZ CORTIZAS

Departamento de Edafología y Química Agrícola, Universidad de Santiago de Compostela, Campus Sur s/n, 15782 Santiago de Compostela

Abstract. The fine earth (FE, <2mm) and silt+clay (SC, <50 μm) fractions of two polycyclic podzolic soils, Pena Cebral (PC) and Curro Vello II (CVII), from northwestern Spain were analyzed for some metallic elements (Cr, Mn, Ni, Zn, Pb, Th) and As. The vertical distribution was studied using detailed concentration profiles, concentration ratios between fractions and enrichment factors. The concentrations obtained for the fine earth of Pena Cebral are: Cr below or close to the detection limit (DL, <50 mg kg⁻¹); Mn <30-373 mg kg⁻¹; Ni <3-27 mg kg⁻¹; Cu 3-14 mg kg⁻¹; Zn 22-52 mg kg⁻¹; As <5-13 mg kg⁻¹; Pb 19-75 mg kg⁻¹; and Th 10-23 mg kg⁻¹. For Curro Vello II are: Cr below DL in all fine earth samples; Mn 40-285 mg kg⁻¹; Ni <5-15 mg kg⁻¹; Cu <3-12 mg kg⁻¹; Zn 15-88 mg kg⁻¹; As <5-11 mg kg⁻¹; Pb 24-56 mg kg⁻¹; and Th 10-32 mg kg⁻¹. All the elements showed higher concentrations in the SC than in the FE and also than those estimated for the sands (up to 4.5 times). Moreover, those elements with concentrations below DLs showed detectable contents in the fine fractions.

The distribution of the elements was found to be affected by podzolisation (Zn, As and Pb) and deposition of atmospheric pollutants (Mn, Zn, Cu and Pb). The chronology of Zn, Cu and Pb enrichments in both soils suggests a direct influence of atmospheric pollution by mining and metallurgy since ancient times, which is consistent with the findings of other studies using ice cores, lake sediments and peat bogs in Europe and particularly in NW Spain, stating the importance of human activities in the cycles of these elements. On the other hand, the higher enrichment found in the Curro Vello II soil for elements which are tracers of the emissions of a nearby coal-fired power station and vehicles, shows the incidence of recent point sources of atmospheric pollution in the area where this soil is located. The Th profile seems to be independent of podzolisation, but it probably is related to the leaching of the element due to dissolution of the host minerals under an extremely acid environment with high sulphate availability.

Key words: polycyclic soils, podzolisation, metallic elements, arsenic, atmospheric pollution

Resumen. La distribución vertical de siete elementos metálicos (Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Pb y Th) y de As se estudió en la tierra fina (<2 mm) y en la fracción limo+arcilla (<50 μm) de dos suelos policíclicos podsólicos de Galicia, Pena Cebral (PC) y Curro Vello II (CVII). Las concentraciones obtenidas en el suelo de Pena Cebral para la tierra fina fueron: para Cr contenidos por debajo del límite de detección (LD, <50 mg kg⁻¹); Mn <30-373 mg kg⁻¹; Ni <3-27 mg kg⁻¹; Cu 3-14 mg kg⁻¹; Zn 22-52 mg kg⁻¹; As <5-13 mg kg⁻¹; Pb 19-75 mg kg⁻¹; y Th 10-23 mg kg⁻¹. En el caso de Curro Vello II, el Cr estuvo en todas las muestras por debajo del límite de detección; Mn 40-285 mg kg⁻¹; Ni <5-15 mg kg⁻¹; Cu <3-12 mg kg⁻¹; Zn 15-88 mg kg⁻¹; As <5-11 mg kg⁻¹; Pb 24-56 mg kg⁻¹; y Th 10-32 mg kg⁻¹. Las concentraciones en la fracción limo+arcilla fueron superiores a las de la tierra fina y a las estimadas para la fracción arena (hasta 4.5

veces) para todos los elementos analizados, e incluso aquellos que se encontraban por debajo del límite de detección en la tierra fina presentaron concentraciones detectables en el limo+arcilla.

Los resultados obtenidos indican que la distribución de los elementos determinados en estos dos suelos está condicionada fundamentalmente por el proceso de podsolización, como ocurre para Zn, As y Pb, y por la deposición de contaminantes atmosféricos, tal como ocurre con Mn, Zn, Cu y Pb. La cronología de los enriquecimientos de Zn, Cu y Pb en ambos suelos sugiere una influencia directa de los procesos de contaminación atmosférica por minería y metalurgia desde épocas antiguas, y es similar a la encontrada en otros estudios a partir de testigos de hielo, sedimentos lacustres y turberas en Europa y, en particular, en el NW peninsular; lo cual pone de manifiesto la influencia de las actividades humanas sobre los ciclos de estos elementos en los suelos. Por otro lado, el mayor enriquecimiento en el suelo de Curro Vello II, particularmente de aquellos elementos que son trazadores de las emisiones de la central térmica de As Pontes y del tráfico rodado, ponen de manifiesto la incidencia de focos de contaminación en épocas recientes en el área donde se encuentra ubicado este suelo. El Th, sin embargo, presenta un perfil vertical que es independiente de los procesos de podsolización, pero que parece responder a la pérdida del elemento debida a la disolución de los minerales hospedadores en un ambiente extremadamente ácido y con elevada disponibilidad de sulfato.

Palabras clave: suelos policíclicos, podsolización, elementos metálicos, arsénico, contaminación atmosférica

INTRODUCCIÓN

Habitualmente se considera que la contaminación atmosférica surge como el resultado del desarrollo tecnológico moderno y que, por lo tanto, tiene lugar sobre todo después de la Revolución Industrial del siglo XIX. Sin embargo, Nriagu (1996) sugiere que la contaminación medioambiental causada por metales pesados comenzó con la domesticación del fuego: la deposición de pequeñas cantidades de metales traza liberados durante los incendios forestales alteraron los niveles de acumulación en algunos ecosistemas. Con el descubrimiento de la minería y el procesado de los metales se inició una estrecha relación entre la contaminación y las actividades humanas.

La contaminación atmosférica de origen antrópico en épocas antiguas ya fue objeto de estudio en numerosos trabajos (Hong *et al.*, 1996; Nriagu, 1996; Shotyk *et al.*, 1996; Martínez Cortizas *et al.*, 1997a,b); a pesar de que los tipos de archivos empleados son diferentes (hielos, turberas, sedimentos de lagos, etc.), todos parecen indicar que el incremento de algunos elementos pesados, como Pb y Cu,

por encima de los valores naturales comienza con el descubrimiento de los metales, mostrando un máximo histórico durante el auge del Imperio Romano unos 2.000 años antes del presente (Martínez Cortizas *et al.*, 2002).

Cabe también señalar que la deposición atmosférica de metales pesados y otros elementos traza en suelos, así como su paso a las aguas superficiales y su papel en el ciclo de nutrientes, son de gran interés debido a los efectos potenciales que puedan ejercer sobre los ecosistemas acuáticos y terrestres y sobre la salud pública. Conocer el comportamiento de estos elementos en el ambiente del suelo será, por lo tanto, un factor clave para evaluar sus posibles riesgos, sobre todo teniendo en cuenta que el tiempo de residencia de los metales pesados en los suelos es mayor que en otros compartimentos de la biosfera. Entre las propiedades que gobiernan el comportamiento de los elementos traza en el suelo las más importantes son el pH, el potencial redox y la cantidad y tipo de materia orgánica (Alloway, 1990; Kabata-Pendias & Pendias, 1992). Así, tasas elevadas de movilidad incrementan la biodisponibilidad de los elementos y su lixiviado hacia las aguas superfi-

ciales, incrementando el riesgo medioambiental. Además de ser sumideros geoquímicos de algunos elementos traza, los suelos también actúan como amortiguadores naturales controlando el transporte de elementos químicos al aire, a las aguas superficiales y a la biota (Kabata-Pendias & Pendias, 1992).

En este estudio se presentan resultados para dos suelos podsólicos policíclicos. Los podsoles son suelos que se caracterizan por la movilización de materia orgánica, Fe y Al desde horizontes eluviales (A, E) y su precipitación en horizontes espódicos iluviales (Bh, Bs), combinando por lo tanto dos ambientes distintos. Por una parte, en los horizontes superficiales, la elevada movilidad es consecuencia del bajo pH y de la abundancia de materia orgánica soluble, mientras que en los subsuperficiales dominan los procesos de precipitación y adsorción. Estas características justifican el especial interés que ofrecen los suelos podsólicos en el estudio de la distribución de estos elementos. Además, se trata de dos perfiles de carácter policíclico y poligenético, lo que sugiere que el proceso de podsolización no actuó de manera uniforme a lo largo del tiempo, viéndose interrumpido en algún momento de su evolución, bien por causas climáticas, bien por causas erosivas. La duración de los períodos de estabilidad durante los que actúa la podsolización será un factor condicionante en la distribución de los elementos en profundidad.

Aquí describimos los resultados del análisis de dos suelos, en los que se determinaron de ocho elementos (Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Pb, Th) en la tierra fina (<2mm) y en la fracción limo+arcilla (<50µm). La distribución vertical y el fraccionamiento de los elementos se discute empleando tanto concentraciones, relaciones entre las diferentes fracciones, como factores de enriquecimiento. Los principales objetivos son: 1) conocer la distribución vertical de estos elementos en suelos complejos; 2) establecer su fraccionamiento por medio de las concentraciones en

las fracciones finas (limo+arcilla); 3) obtener información sobre los factores que afectan a su distribución, tanto vertical como en las distintas fracciones granulométricas, con particular interés en la importancia de la contaminación atmosférica derivada de las actividades humanas.

MATERIAL Y MÉTODOS

Material

Los dos suelos estudiados en este trabajo son suelos policíclicos que presentan más de un ciclo de podsolización y están ubicados en áreas de montaña del noroeste de la Península Ibérica. Curro Vello II (CVII) se encuentra en la Serra do Xistral, a 700 m s.n.m, y a unos 25 km al este de la central térmica de As Pontes de García-Rodríguez, la cual representa desde 1979 un importante foco emisor de contaminantes atmosféricos. Pena Cebral (PC) está en la Serra dos Ancares, a 1120m s.n.m (Figura 1) en un área de difícil accesibilidad y con mucho menor impacto del tráfico rodado que CVII.



Figura 1. Localización de las áreas de estudio donde se encuentran los suelos (Pena Cebral, PC; Curro Vello II, CVII)

Ambos suelos fueron muestreados en el año 1996. Las muestras se tomaron a intervalos regulares de 5 cm, hasta una profundidad de 1,05 m en Curro Vello II y 2,20 m en Pena Cebral. En PC sólo se tomaron dos muestras del horizonte más profundo: una en el límite superior y otra hacia la base del perfil. La caracterización físico-química y mineralógica, así como su clasificación y génesis ha sido realizada anteriormente por Moares Domínguez (1997) y resumida en otro trabajo (Peiteado *et al.*, en este volumen).

Métodos

Se determinó el contenido total de siete elementos metálicos (Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Pb, Th) y uno no metálico (As) tanto en la tierra fina (TF, <2 mm) como en la fracción limo+arcilla (LA, <50 μm). Para separar la tierra fina de la fracción gruesa del suelo una vez secas al aire las muestras, se empleó un tamiz de 2mm de luz; la muestras obtenidas se molieron con un mortero de ágata y se homogeneizaron. La fracción fina (limo y arcilla) se obtuvo agitando 125 g de muestra de tierra fina –sin pretratamiento– con 125 mL de agua ultrapura durante 16 horas y pasándola a través de un tamiz de 50 μm ; después de secar hasta peso constante la fracción LA se molió con un mortero de ágata y se homogeneizó.

Las concentraciones de los elementos se obtuvieron utilizando un equipo EMMA-XRF (Energy-dispersive Miniprobe Multielement Analyzer) en Key Analytical (Canadá), empleando radiación Mo K α o Mo K β . El EMMA así como su aplicación en el análisis de elementos han sido descritos en otros trabajos (Cheburkin & Shotyk, 1996; Weiss *et al.*, 1998; Shotyk *et al.*, 2000). El aparato fue calibrado usando materiales de referencia estándar certificados (NIST 1515, 1541, 1547 y 1575, BCR-60, BC-62 y V-1). Los límites de detección para los elementos determinados son: 50 mg kg⁻¹ para el Cr, 30 mg kg⁻¹ para el Mn, 5 mg kg⁻¹ para el Ni, 3 mg kg⁻¹ para el Cu, 2 mg kg⁻¹ para el Zn, 5

mg kg⁻¹ para el As, 2.5 mg kg⁻¹ para el Pb y 4 mg kg⁻¹ para el Th.

Muestras de fracción limo+arcilla de los horizontes 3A y 4A de Pena Cebral fueron enviadas al laboratorio Beta (Miami, USA) para la determinación de la edad radiocarbónica de la materia orgánica del suelo (¹⁴C). Para el suelo de Curro Vello II se dispone de edades estimadas mediante la comparación del registro polínico del suelo con la zonación polínica regional, para la cual se dispone de una cronología bastante precisa (Ramil Rego, 1992; Martínez Cortizas y Moares Domínguez, 1995; Moares Domínguez, 1997).

RESULTADOS

Concentraciones medias

En la Tabla 1 se presentan las concentraciones medias de los 8 elementos analizados para ambos suelos, tanto en la tierra fina como en la fracción limo+arcilla. Cuatro de los elementos analizados (Cr, Mn, As y Ni) presentaron valores cerca o por debajo del límite de detección, lo cual impone ciertas limitaciones a la interpretación tanto de los valores medios como de los perfiles de concentración. En CVII, el Cr y el Ni están por debajo de los límites de detección (50 mg kg⁻¹ y 5 mg kg⁻¹ respectivamente) tanto en la tierra fina como en los limos y arcillas en todas o la mayoría de las muestras de suelo analizadas, mientras que en PC, para el Cr, de las 34 muestras analizadas, 17 en la tierra fina y 27 en los limos y arcillas presentaron concentraciones detectables, aunque próximas al límite de detección de la metodología analítica utilizada. En este mismo suelo, el Mn, en las dos fracciones, y el As, en la tierra fina, mostraron también niveles por debajo del límite de detección en algunas muestras.

En Pena Cebral (PC) el orden de mayor a menor concentración media, teniendo en cuenta las incertidumbres que acabamos de mencionar, sería Mn,Cr>Pb>Zn>Th>Ni>Cu>As

Tabla 1. Concentraciones medias y desviación estándar (entre paréntesis) para Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Pb y Th por perfil en la tierra fina (TF, <2 mm) y en la fracción limo+arcilla (LA, <50 μm).

	PC		CVII	
	TF	LA	TF	LA
Cr	52,3 (4,3)	64,7 (14,4)	50,0 (0,0)	51,0 (3,7)
Mn	52,7 (60,8)	52,0 (39,9)	105,3 (65,2)	149,2 (99,1)
Ni	12,1 (5,7)	13,2 (5,5)	7,1 (3,2)	11,3 (5,2)
Cu	9,2 (2,8)	13,1 (3,1)	6,2 (3,3)	11,6 (7,6)
Zn	36,6 (6,8)	47,6 (8,3)	35,5 (20,9)	66,1 (31,8)
As	5,9 (1,9)	8,9 (3,2)	5,4 (1,3)	8,7 (2,5)
Pb	41,6 (13,1)	57,6 (14,1)	31,4 (8,4)	38,4 (15,2)
Th	15,6 (3,5)	20,1 (4,7)	18,0 (6,3)	24,0 (7,0)

para la tierra fina y Cr>Pb>Mn>Zn>Th>Ni,Cu>As para la fracción limo+arcilla. En CVII, en la tierra fina sería Mn>Zn>Pb>Th>Cu>As y en el limo+arcilla Mn>Zn>Pb>Th>Cu, Ni>As.

En ambos suelos los elementos que presentan mayor concentración media para la tierra fina son Cr y Mn (muestras con valores superiores al límite de detección), con valores ligeramente superiores a 50 mg kg⁻¹, salvo el Mn en CVII que alcanza los 105 mg kg⁻¹. Estos resultados se mantienen para la fracción limo+arcilla, excepto un ligero incremento hasta 68 mg kg⁻¹ para el Cr en PC y un aumento más importante para el Mn en CVII, que se aproxima a los 150 mg kg⁻¹. Los elementos que siguen en orden decreciente de concentración son Zn y Pb, con valores entre 36 mg kg⁻¹ (TF) y 47 mg kg⁻¹ (LA) en PC, y entre 35 mg kg⁻¹ (TF) y 66 mg kg⁻¹ (LA) en CVII para el Zn; para el Pb los valores oscilan entre 41 mg kg⁻¹ (TF) y 57 mg kg⁻¹ (LA) en PC, y entre 31 mg kg⁻¹ (TF) y 38 mg kg⁻¹ (LA) en CVII. Los elementos restantes muestran concentraciones medias inferiores a 25 mg kg⁻¹, presentando el Th valores en torno a los 20 mg kg⁻¹ (algo más elevados en CVII que en PC), Ni y Cu poseen concentraciones semejantes en los dos suelos (entre 6 y 13 mg kg⁻¹), y el As entre 3 y 9 mg kg⁻¹, con valores siempre superiores en PC.

En conjunto, en la tierra fina, Ni, Cu y Pb presentan concentraciones mayores en PC; Mn y Th aparecen en concentraciones más elevadas en CVII y As, Cr y Zn muestran valores similares en los dos. Para la fracción limo+arcilla, los valores de As, Cr y Pb son mayores en el perfil de PC, los de Cu y Ni son semejantes en ambos perfiles y Mn, Zn y Th poseen valores más altos en CVII.

Perfiles de concentración

En la Figura 2 se representan los perfiles verticales de concentración de los elementos estudiados (Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Pb, Th) en la tierra fina y en la fracción limo+arcilla. Por lo que respecta a la distribución de los elementos en cada perfil, se puede observar que algunos presentan comportamientos semejantes. Así, en el caso de PC, Zn, Cu y Ni muestran un patrón con escasas variaciones en profundidad y similar para ambas fracciones, alcanzándose los mínimos en el horizonte eluvial (4E) e incrementos ocasionales en los espódicos, en particular para el Zn en el horizonte 3Bs (donde llega a los 70 mg kg⁻¹ en la fracción LA). En el caso del Th, también con una distribución bastante constante en la vertical, parece advertirse un ligero aumento con la profundidad y sobre todo en los horizontes 5Bs y 5Bs/C (hasta los 32 mg kg⁻¹ en el horizonte 5Bs/C en la fracción LA). Los aumentos en los espódicos son más des-

tacables para Pb y As, aunque en este último se restringe a los horizontes 5Bhs y 5Bs/C. El Mn tan sólo tiene concentraciones superiores al límite de detección en el ciclo I, en el que se observa un incremento de la concentración

en ambas fracciones en la transición 1A-1Bw, y fundamentalmente en la base del suelo, hasta 373 mg kg⁻¹ en la tierra fina.

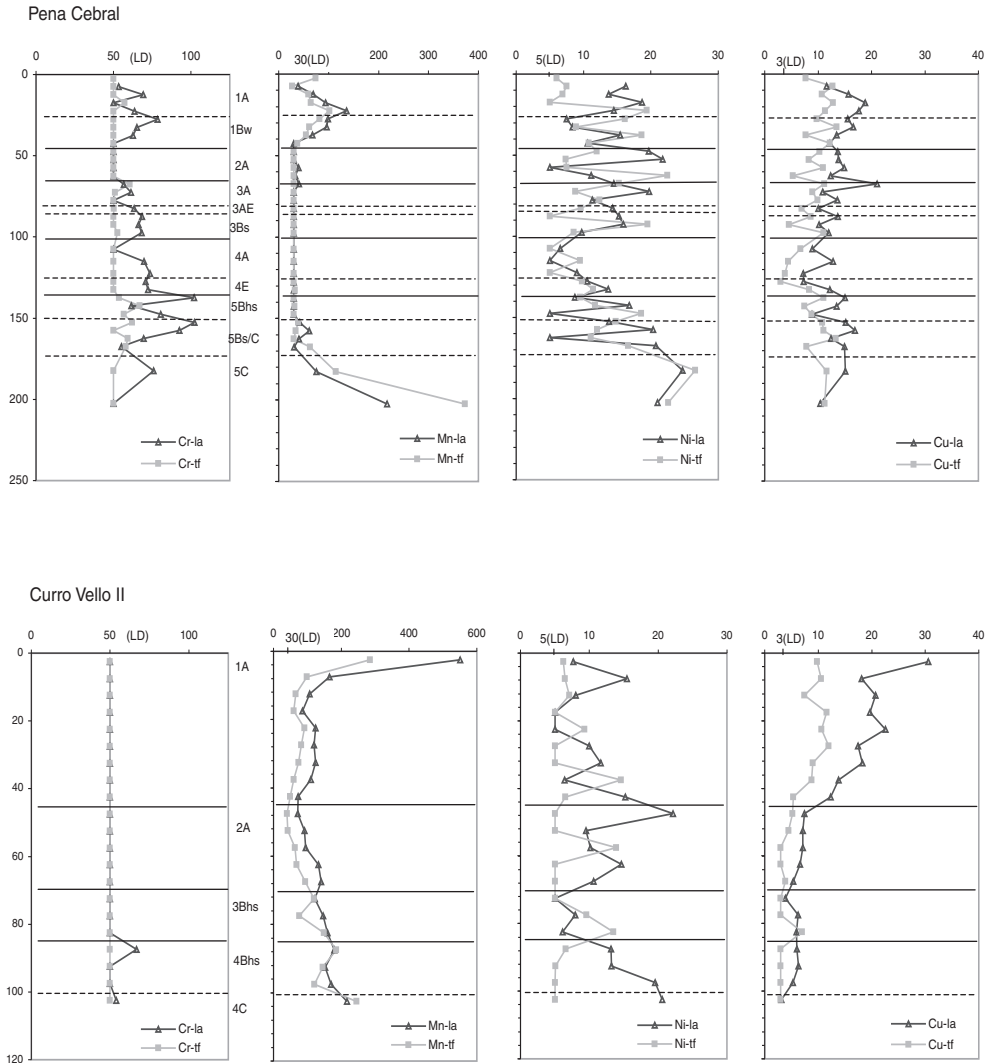


Figura 2. Perfiles verticales de concentración (en mg kg⁻¹) para Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Pb y Th en la tierra fina (tf) y la fracción limo+arcilla (la) en Pena Cebral (PC) y Curro Vello II (CVII). Los contenidos no detectables se representaron con el valor correspondiente al límite de detección (LD).

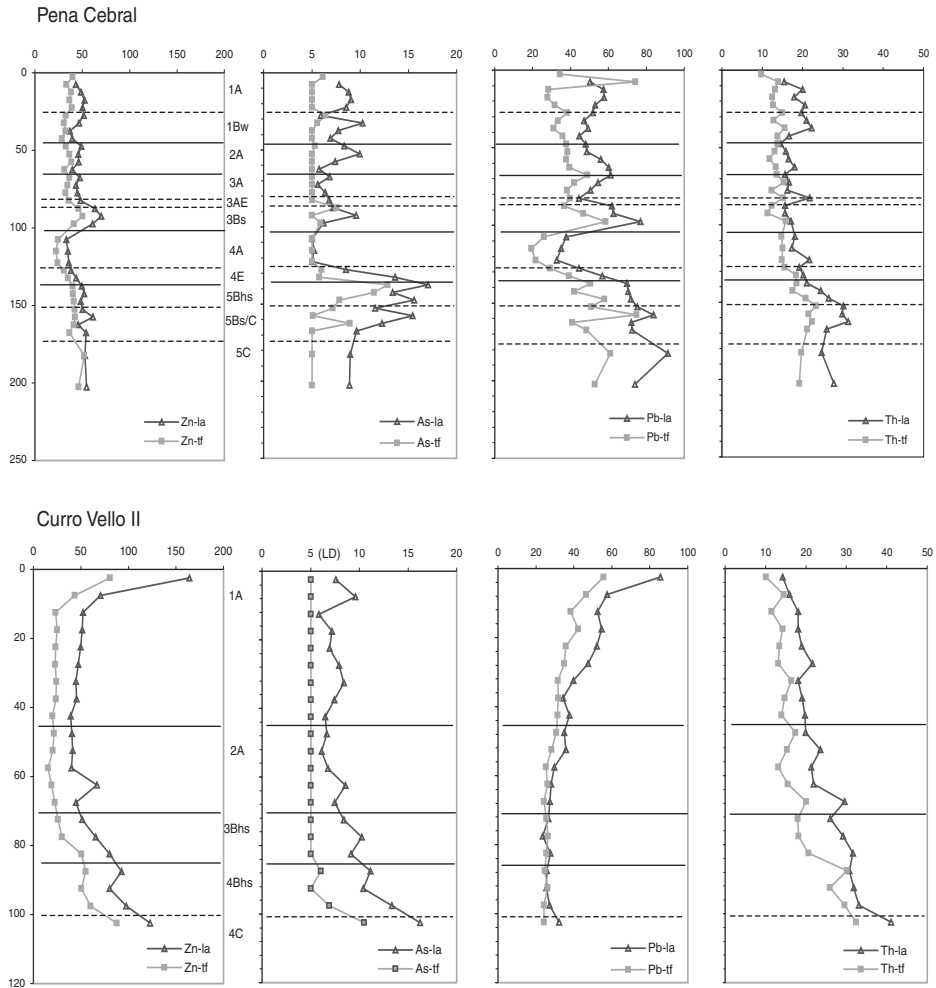


Figura 2.(contin.). Perfiles verticales de concentración (en mg kg^{-1}) para Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Pb y Th en la tierra fina (tf) y la fracción limo+arcilla (la) en Pena Cebral (PC) y Curro Vello II (CVII). Los contenidos no detectables se representaron con el valor correspondiente al límite de detección (LD).

En CVII, el Mn y el Zn muestran máximos de concentración en la superficie (hasta 550 y 164 mg kg^{-1} respectivamente en la fracción limo+arcilla) y en la parte más profunda del suelo, mientras que en el resto del perfil la concentración es bastante constante en las dos fracciones (TF, LA). El As tiene un patrón similar, pero sólo con un aumento progresivo en los horizontes basales del suelo.

Para Cu y Pb, la concentración aumenta progresivamente a partir de la base del ciclo II hasta la superficie, de manera más pronunciada en el caso de la fracción limo+arcilla (que en superficie llega a ser de hasta tres veces la concentración de la tierra fina en el caso del Cu), mientras que la concentración de Th aumenta de manera progresiva con la profundidad, hasta 41 mg kg^{-1} en la fracción LA en

el horizonte 4C. El Cr en los dos suelos y el Ni en CVII no son evaluables, dadas las limitaciones impuestas por el límite de detección.

Fraccionamiento físico-químico de los elementos

Tanto en PC como en CVII, la mayoría de los elementos muestran concentraciones más elevadas en la fracción limo+arcilla que en la tierra fina, por lo que las fracciones finas del suelo podrían estar enriquecidas y las fracciones gruesas empobrecidas en estos elementos. Para dar una idea del grado de enriquecimiento/empobrecimiento, se calcularon dos índices sencillos: la relación de concentraciones entre la fracción limo+arcilla y la estimada para la arena (RC), y la proporción de cada elemento que se encuentra en las fracciones finas (P_{LA}):

$$RC = [LA]/[AR];$$

$$\text{donde } [Ar] = ([TF] - a[LA]) / (1 - a)$$

$$P_{LA} = ((a[LA]) / [TF]) 100$$

representando [LA], [AR] y [TF] la concentración de cada elemento en la fracción limo+arcilla, arena y tierra fina respectivamente; y "a" es la proporción de limo y arcilla en la tierra fina del suelo (en g g⁻¹).

La determinación del contenido total de elementos en las diferentes fracciones granulométricas, un método ya empleado en otros estudios (Berrow *et al.*, 1991; Buurman *et al.*, en prensa), puede proporcionarnos información adicional sobre los procesos y grado de meteorización de los suelos. En este sentido, el cálculo de la relación entre las concentraciones de los elementos en la fracción LA y en la fracción arena puede resultar útil al ofrecer un índice de la tendencia de los elementos a concentrarse en las distintas fracciones del suelo. Así, durante la meteorización, el perfil pierde aquellos elementos que son más móviles, disminuyendo su concentración en las fracciones finas, mientras que los que no son eliminados se concentrarán en ésta en mayor medida.

Aunque ello dependerá también en parte del tamaño de partícula de los minerales.

Como ya se indicó, para la mayoría de los elementos la concentración en la fracción LA es superior a la obtenida para la TF. Dado que esta última engloba las fracciones arcilla, limo y arena (Ar), se deduce que la concentración de los elementos en la arena tiene que ser menor. La relación RC no se calculó para el Cr debido a que presenta numerosos valores por debajo del límite de detección; esto mismo ocurre para el Mn en PC y el As en CVII, así como para Ni y Cu en algunas muestras de CVII y para As en algunas de PC.

Los valores medios por suelo están representados en la Figura 3a. En PC el Th posee una relación del orden de 4.4; Cu y Pb, entre 3 y 4; As y Zn, entre 2 y 3; y Ni, de 1.8. En CVII Cu y Zn presentan valores de RC de 3.8 y 4 respectivamente; Ni y Mn, entre 2 y 3; y Th y Pb, entre 1 y 2.

A la hora de realizar una interpretación general de la presencia de estos elementos en el suelo es conveniente conocer, además de la concentración de los mismos, su contenido en las diferentes fracciones granulométricas, lo cual es expresado por la P_{LA} . Al igual que sucede con la RC, la P_{LA} no fue calculada para aquellos elementos que presentaban un gran número de valores por debajo del límite de detección; este es el caso del Mn en PC, del Ni y del Cu en CVII y del As en ambos perfiles. En la Figura 3b se presentan los valores medios de la proporción de cada elemento en la fracción limo y arcilla de cada suelo. Se observa que, en el caso de PC, todos los elementos poseen P_{LA} superiores al 50%, mientras que en el caso de CVII esto tan sólo se cumple para el Zn. Así, en PC, Cu y Pb presentan una proporción media en torno al 70%; Zn y Th, entre 60 y 65%, y para el Ni la P_{LA} es del orden del 54%. En CVII el Mn, Pb y Th muestran una P_{LA} entre el 40% y el 50%, mientras que para el Zn un 63% del elemento se encuentra en la fracción limo y arcilla.

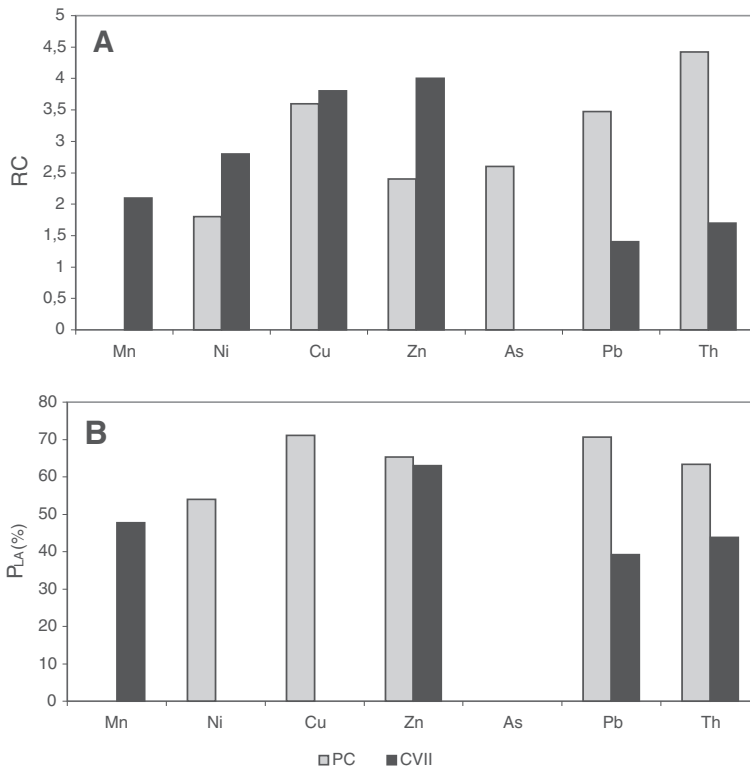


Figura 3. Valores medios de A) la relación de concentración en la fracción limo+arcilla y la estimada para la fracción arena (RC) en Pena Cebral (PC) y Curro Vello II (CVII) y B) la proporción de cada elemento en la fracción limo+arcilla (en %) para ambos suelos.

Factores de enriquecimiento (FE)

El cálculo de los factores de enriquecimiento (FE) resulta útil para determinar el mayor o menor enriquecimiento de un elemento teniendo en cuenta las variaciones naturales en la abundancia del mismo debidas a la composición litológica, un método empleado en numerosos estudios para diversos elementos (Kempton *et al.*, 1997; Chesworth *et al.*, 1998; Martínez Cortizas *et al.*, 2000; Shotyk *et al.*, 2000; Baize *et al.*, 2001). Los FE se obtienen normalizando las concentraciones de los metales a un elemento conservativo (Schütz y Rahn, 1982); en este caso se utilizó el Ga tal como sugieren para estos suelos Peiteado *et al.* (en este volumen).

Estos resultados a su vez se normalizan a la relación metal/Ga obtenida a partir de los valores medios de concentración dados por Wedepohl (1995) para la corteza continental superior.

Los FE indican que Mn, Cu y Zn tienden a estar menos enriquecidos, mientras que el Pb está más enriquecido que en la corteza continental (Figura 4). En PC, el Mn aparece fuertemente enriquecido en la base del perfil y ligeramente en el ciclo I; el Cu presenta pequeñas variaciones, con una tendencia a disminuir desde la superficie hacia el horizonte 4E, para aumentar y mantenerse casi constante en los horizontes basales; el Zn está fuertemente enriquecido en los horizontes

3Bs, 2A y en la superficie del suelo actual, mientras que el Pb muestra enriquecimientos del 5Bhs al 5C, en el 3Bs, en el 2A y en la superficie actual. En CVII, sin embargo, los

mayores enriquecimientos relativos se encuentran en el ciclo superficial, de hasta 8-9 veces para el Cu, 8-10 veces para el Zn, 7-9 veces para el Mn y 6 veces para el Pb.

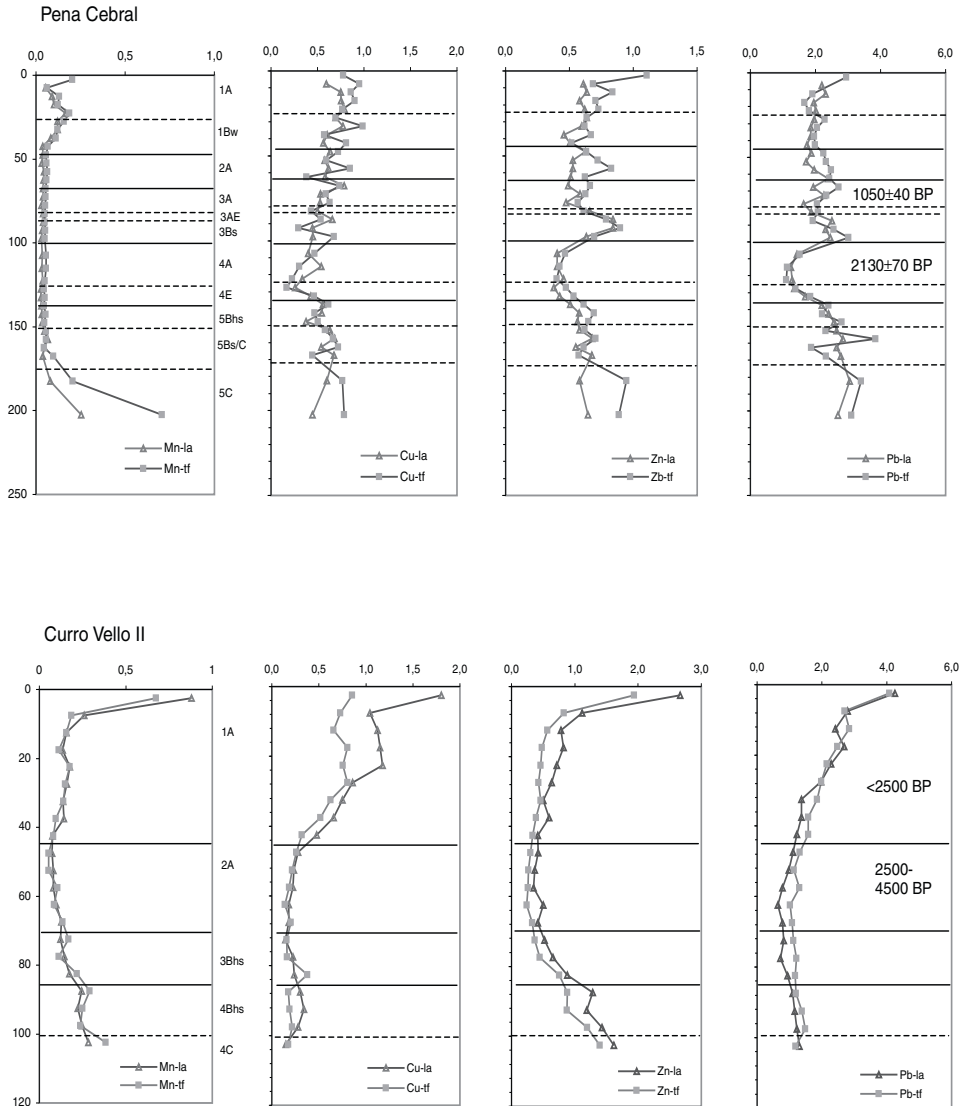


Figura 4. Factores de enriquecimiento para Mn, Cu, Zn y Pb en las fracciones tierra fina (tf) y limo+arcilla (la) en Pena Cebral (PC) y Curro Vello II (CVII), calculados empleando como elemento de referencia el Ga.

DISCUSIÓN

Comparación de las concentraciones obtenidas (TF) con las de otros estudios

En la Tabla 2 se muestra una síntesis de la comparación entre los rangos de concentraciones de los elementos obtenidos para estos suelos (PC y CVII) y las dadas tanto para materiales de partida (horizontes C) (Guitián Ojea, 1992) como para rocas de otras áreas. En Macías et al. (1993) se pueden encontrar valores de mediana de referencia para metales pesados en epipedones de suelos sobre diversos materiales de partida de Galicia. En el caso de PC cabe señalar que el suelo está empobrecido en Mn y Zn y enriquecido en Pb con respecto a los materiales de partida del entorno, mientras que para CVII sólo el Zn muestra concentraciones diferentes (menores) que las dadas para horizontes C del área. Como ya se indicó en el

apartado de resultados, todos los elementos muestran concentraciones superiores en la fracción limo+arcilla, lo cual se refleja en valores de RC siempre superiores a la unidad en ambos perfiles. Una posible explicación para las mayores concentraciones de los elementos en tamaños de partícula más pequeños sería que, mientras que en estos existe una mayor variedad de minerales (plagioclasas, feldspatos-K, micas, minerales de la arcilla), en tamaños de partícula mayores se encuentran pocas fases mineralógicas empobrecidas en elementos metálicos (por ejemplo cuarzo), algo observado ya en otros trabajos (Schütz y Rahn, 1982). Sin embargo, para CVII hay algunos elementos en los que la proporción en el limo+arcilla con respecto a la tierra fina (P_{LA}) no supera el 50%, debido probablemente a que se trata de un suelo en el que dominan las fracciones gruesas.

Tabla 2. Valores de referencia para materiales de partida de Galicia y rocas de otras áreas, así como rangos de las concentraciones encontradas para los elementos analizados en este estudio (fracción tierra fina, < 2mm, y fracción limo+arcilla, < 50 mm). Valores en mg kg⁻¹.

	Pena Cebral ¹		Curro VelloII ¹		Galicia ²		Otros estudios
	<2 mm	<50µ m	<2 mm	<50µ m	Ancares	Xistral	
Cr	<50-66,8	<50-102	<50	<50-66,7	<50-100	10-50	150 rocas ácidas ³ 0,6 rocas metamórficas ⁴
Mn	<30-373	<30-217	40-284,8	71,3-550,5	200-1000	100-200	200-1200 rocas ácidas ³ 200-1200 rocas metamórficas ³
Ni	<5-26,6	<5-24,7	<5-14,6	<5-22,2	<50	<50	5-15 rocas ácidas ⁴ 50-70 rocas metamórficas ⁴
Cu	<3-13,5	7,2-21,0	<3-11,9	3,11-30,6	5-25	10-25	10-30 rocas ácidas ⁴ 40 rocas metamórficas ⁴
Zn	22,7-52,12	33-69,8	15,3-87,7	39,3-164,3	>100	>100	40-60 rocas ácidas ⁵ 80-120 rocas metamórficas ⁴
As	<5-12,9	<5-17	<5-10,5	5,8-16,3	1-2	1-2	1-2,6 rocas ácidas ⁴ 5-13 rocas metamórficas ⁴
Pb	19,3-74,8	32,8-91,5	24,7-55,6	23,7-85,5	-	27,8-47,1	15-24 rocas ácidas ⁴ 18-25 rocas metamórficas ⁴
Th	9,7-23,3	14,5-31,3	10,2-32,4	14,3-41,1	-	27,8-47,1*	10-23*

1. Este estudio, 2. Guitián Ojea et al. (1992), 3. Aubert et al. (1977), 4. Kabata-Pendias et al. (1992), 5. Aller et al. (1989), *Taboada et al. (2001)

Distribución vertical y fraccionamiento de los elementos

Los resultados comentados hasta aquí sugieren que las concentraciones y la distribución vertical de los elementos están controladas por cuatro factores: la composición mineralógica del material de partida, el ambiente geoquímico (meteorización y edafogénesis), el reciclado biológico y la deposición atmosférica. La compleja interacción entre ellos será la responsable última de las distribuciones observadas.

La diferente composición mineralógica de los dos suelos se podría reflejar en el hecho de que en CVII las concentraciones de Mn y Zn, en particular en las fracciones finas, son más elevadas que en PC, mientras que en este último suelo es el Ni el que aparece en mayor concentración. Sin duda, la tendencia a que la concentración de todos los elementos sea mayor en las fracciones finas es producto de la meteorización, lo cual coincide con lo encontrado por otros autores. De hecho, Schütz y Rahn (1982) y Schuetz (1989) indican que la mayoría de los elementos traza están fuertemente enriquecidos en las fracciones finas de los suelos como resultado de los procesos de meteorización. No obstante, en el caso de PC el enriquecimiento podría tener también relación con el hecho de que la meteorización física del propio material de partida abastece al suelo de partículas finas, donde las micas son los minerales dominantes, quedando las fracciones gruesas enriquecidas en minerales pobres en elementos traza (cuarzo, por ejemplo). Por otro lado, la tendencia al aumento del cuarzo en las fracciones gruesas también se debe al hecho de que su tamaño de partícula suele ser mayor que el de otros minerales primarios, produciendo por ello una dilución relativa de la mayor parte de los elementos ya que el cuarzo está constituido casi exclusivamente por Si.

Zinc, As y Pb en PC, y tal vez Cr, si sólo se tienen en cuenta las fracciones finas, muestran incrementos de la concentración en

los horizontes espódicos que podrían estar relacionados con el proceso edafogénico dominante, la podsolización. En CVII Mn, Zn y As también muestran fuertes incrementos de la concentración en los horizontes espódicos basales (3Bhs y 4Bhs), probablemente relacionados con el mismo proceso. Para ambos suelos el As muestra correlaciones significativas con las formas de Fe (en PC, $r=0.8$ en la TF) y Al extraídas (en CVII, $r=0.7-0.75$) en oxalato y pirofosfato, y con la arcilla (en CVII, $r=0.89$) que también sugieren la influencia de los procesos de podsolización. Por otro lado, como se discutirá más adelante, los factores de enriquecimiento apoyan también esta interpretación. Chesworth *et al* (1998) encontraron enriquecimientos de Zn y Pb en los horizontes espódicos de podzoles del norte de España, mientras que Bindler *et al* (1999) también refieren enriquecimientos en Pb en los horizontes espódicos de suelos de Suecia.

Por otro lado, en CVII se observa que algunos elementos muestran incrementos en la concentración en los horizontes superficiales: la acumulación para Mn y Zn se restringe a los 10 cm superficiales, mientras que Cu y Pb están enriquecidos desde la base del ciclo I. En PC tan sólo se observa un pequeño incremento en la concentración de Mn en el ciclo superior. Existen dos posibles explicaciones para estos incrementos: la deposición atmosférica de contaminantes derivados de las actividades humanas y la bioacumulación por parte de las plantas.

Manganeso, Zn y Cu son elementos que se pueden ver influenciados por ambos procesos. La marcada influencia del ciclo de nutrientes en la acumulación del Mn ya fue puesta de manifiesto anteriormente por Görres *et al* (1997); otros estudios señalan que tanto Zn como Cu son nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, lo cual podría contribuir al enriquecimiento superficial observado en diversos suelos (Espí *et al.*, 1997; Blaser *et al.*, 2000). De todas formas, y

aunque ambos elementos son muy solubles, el Zn tiende a acumularse en mayor medida, bien por su mayor implicación en el ciclo de nutrientes o bien por la mayor deposición atmosférica de este elemento (Blaser *et al.*, 2000). En este mismo estudio se señala también que incluso elementos como Pb y As, sin un papel biológico conocido, pueden ser absorbidos pasivamente a través del flujo de agua.

No obstante, el biorreciclado por sí sólo no da lugar a marcados enriquecimientos superficiales, por lo que las elevadas concentraciones del ciclo superior (I) en CVII deberán relacionarse con una mayor influencia de la deposición atmosférica de contaminantes. Esta deposición podría atribuirse a un fenómeno de contaminación local producido por las emisiones de la central térmica de Endesa, en As Pontes, localizada tan sólo 25 km al oeste del área de CVII -Zn y Mn son elementos trazadores de las emisiones de esta central-. Este hecho ya fue puesto de manifiesto en un estudio sobre turberas del entorno, en el que se registraron elevados enriquecimientos de Zn, Cd y Pb (Martínez Cortizas *et al.*, 1997b).

Es muy importante señalar que, sin embargo, las variaciones en la concentración de un metal no pueden ser consideradas un reflejo directo de los cambios en el "input" atmosférico del elemento por actividades humanas, por esto habitualmente se recurre al cálculo de factores de enriquecimiento (FE) para diferenciar las fuentes antropogénicas de las naturales.

Con respecto a los factores de enriquecimiento, lo más destacable son las variaciones relativas en los perfiles (Figura 4). Así, en PC, se observan enriquecimientos para Zn y Pb en los horizontes espódicos -sobre todo en el 3Bs- lo cual pone de manifiesto que, como fue comentado con anterioridad, estos elementos se movilizan durante la podsolización. En CVII, sin embargo, los mayores enriquecimientos relativos se encuentran en

el ciclo superficial y no en los horizontes espódicos, donde apenas se observan pequeños incrementos para Mn y Zn. Estos importantes enriquecimientos superficiales, superiores a los encontrados en PC, apoyarían la hipótesis sugerida anteriormente de la fuerte componente de contaminación local que afecta al suelo de CVII.

En estudios anteriores, otros autores encontraron que la deposición atmosférica es también la principal responsable de la acumulación de metales como el Pb en concentraciones superiores a los valores de fondo (West *et al.*, 1997; Lichter, 1998), particularmente en los horizontes superiores de los suelos (Lichter, 1998; Baize *et al.*, 2001). Diversos estudios realizados en los hielos árticos y antárticos, en sedimentos lacustres y en turberas (Görres *et al.*, 1997; Hong *et al.*, 1997; Shotyk *et al.*, 2000; Martínez Cortizas *et al.*, 2002) pusieron de manifiesto que la contaminación atmosférica por Pb y Cu, y por lo tanto su deposición en sistemas superficiales, comenzó hace por lo menos 3.000 años, mientras que, para el norte peninsular, Martínez Cortizas *et al.* (1997b) detectan los primeros indicios de contaminación atmosférica por Zn en turbas de 1.000 años de antigüedad y una elevadísima contaminación en los últimos 30 años. Los FE de los suelos parecen ser coherentes con la cronología de la contaminación atmosférica (Figura 4). Así, el Zn está enriquecido a partir del horizonte 3Bs en PC y en los 10 cm superficiales de CVII. El horizonte 3A de PC tiene una edad de unos 1050 BP (Figura 4), mientras que el ciclo I de CVII se estima que se formó con posterioridad a unos 2500 años. Por su parte, Cu y Pb están enriquecidos en niveles más profundos, que tienen edades más próximas a los inicios de la contaminación atmosférica: en PC, los FE de los horizontes 5Bs y 5Bs/C son semejantes a los del 3Bs y la datación hecha en el horizonte 4A dio una edad de 2130 BP, mientras que en CVII los dos elementos aparecen enriquecidos desde el ciclo

II, que pertenece al intervalo cronológico de 4500-2500 años. Aunque no se puede descartar la influencia de las condiciones geoquímicas (Eh y pH) en la distribución de estos elementos metálicos, los resultados sugieren que los procesos de contaminación atmosférica, antigua y actual, juegan un papel importante.

Finalmente, el Th es el único elemento que muestra un perfil vertical de aumento progresivo con la profundidad, especialmente en el caso de CVII. Si esta distribución se debiera a la distinta composición mineralógica de los horizontes de los suelos, implicaría un cambio constante e idéntico para la tierra fina y los limos y arcillas en la distribución de los minerales a los que se asocia. Esto parece poco probable dada la compleja historia morfogenética de este suelo –piénsese por ejemplo en el enorme hiato temporal entre el ciclo III y el II-. Existe, por el contrario, una fuerte correlación para ambos suelos entre el contenido de Th, especialmente en las fracciones finas ($r=0.85-0.93$), y el pH en agua y KCl (Figura 5). Analizando el diagrama Eh-pH del Th para el sistema Th-S-O-H realizado

por Brookins (1988), se aprecia que a pH fuertemente ácido y bajo condiciones oxidantes el Th presenta una forma iónica (ThSO_4^{2+}) que podría regular su pérdida del suelo. Esto justificaría el mayor contenido de Th en la base de ambos perfiles, donde el pH es más elevado y, por lo tanto, la movilidad del elemento más baja. Además, el Th también tiene una elevada correlación con la fracción arcilla en CVII ($r=0.88$), suelo en el que las fracciones finas están dominadas por minerales secundarios, lo que podría indicar que hubo una movilización del elemento. En estas condiciones el único factor limitante sería el contenido de S, que en este caso podría proceder del sulfato marino y de las emisiones de la central térmica de As Pontes, tal y como indican otros estudios realizados en el área (García-Rodeja *et al.*, 1997). Así pues, para este elemento, en suelos fuertemente ácidos y sometidos a una elevada deposición de sulfatos (natural y antropogénica) podrían darse las condiciones para la disolución y movilización de los minerales de Th.

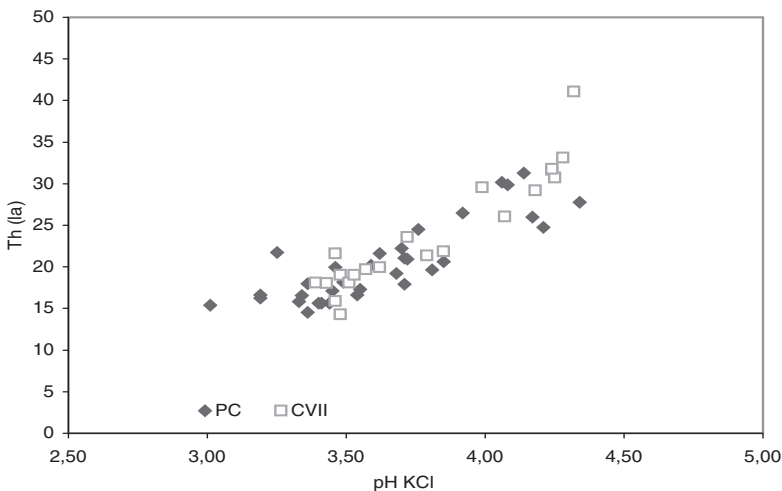


Figura 5. Correlación entre la concentración de Th en la fracción limo+arcilla (la) y el pH en KCl para Pena Cebal (PC) y Curro Vello II (CVII).

CONCLUSIONES

Como se puede deducir de los resultados de este trabajo, las concentraciones y la distribución vertical de los elementos estudiados están afectadas esencialmente por la composición mineralógica del material de partida, la meteorización, la edafogénesis, los procesos de biorreciclado y la deposición atmosférica:

- La diferente composición mineralógica de ambos suelos determina que elementos como Mn y Zn se encuentren en mayores concentraciones en CVII, mientras que el Ni muestra valores más elevados en PC.

- Como resultado de la meteorización, los elementos presentan concentraciones más elevadas en las fracciones finas, aunque en PC este enriquecimiento podría derivarse de la mayor proporción de limos producto del menor tamaño de grano del propio material de partida.

- Los incrementos de concentración de Zn, As y Pb para PC y Mn, Zn y As en CVII parecen indicar que el proceso de podsolización está afectando a su distribución vertical; sin embargo sólo aparecen evidencias claras de enriquecimiento en los horizontes espódicos para Zn y Pb, algo que ya se ha encontrado en otros estudios. De todas formas, no se puede descartar la posible influencia de los procesos redox en el comportamiento de estos elementos, como parece ocurrir con el Mn.

- Mn, Zn, Cu y Pb muestran enriquecimientos superficiales. Para Mn, Zn y Cu el biorreciclado, junto con la contaminación atmosférica, podrían ser los factores dominantes, mientras que en el caso del Pb la intensa acumulación superficial parece deberse sólo a la deposición de contaminantes atmosféricos. En este sentido, cabe resaltar la importancia que parecen jugar las fuentes locales de contaminación, pues la intensidad es mucho mayor en CVII -ubicado a 25 km al este de la central térmica de As Pontes y cerca de una carretera comarcal- que en PC

-más alejado de fuentes de contaminación directa-

- Dadas las edades de los distintos ciclos de los dos suelos estudiados, la cronología de los enriquecimientos debidos a la contaminación atmosférica son coherentes con los resultados obtenidos en otros trabajos a partir del estudio de testigos de hielo, sedimentos lacustres y turberas en Europa y, en particular, en el noroeste peninsular.

En síntesis, la podsolización y la contaminación atmosférica son los factores que influyen en mayor medida en la distribución de los elementos metálicos (Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Pb, Th) y no metálicos (As) analizados en este estudio. Destaca el escaso papel que parecen haber jugado los procesos morfogénicos.

AGRADECIMIENTOS.

Los autores desean expresar su agradecimiento a Andrij Cheburkin (Institute of Environmental Geochemistry, Universidad de Heidelberg, Alemania) y Olena Kurtzel (Key Analytical Inc, Canadá) por los cuidadosos análisis realizados en las muestras de estos suelos; así como a Teresa Taboada y Carlota García Paz (Dept. Edafología y Química Agrícola de la USC) por las útiles discusiones mantenidas.

REFERENCIAS

- Aller, A.J., Bernal, J.L., del Nozal, M.J. (1989): *Geochemistry of trace elements*. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. Comunicaciones INIA-Tecnología Agraria, Madrid, 38 p.
- Alloway, B.J. (Ed.) (1990): *Heavy metals in soils*. Blackie. 399 p.
- Aubert, H. y Pinta, M. (1977): *Trace elements in soils*. Elsevier, Amsterdam, 395 p.

- Baize, D. y Sterckeman, T. (2001): Of the necessity of knowledge of the natural pedo-geochemical background content of soils by trace elements. *Science of the Total Environ.* 264, 127-139.
- Blaser, P., Zimmermann, S., Luster, J., Shotyk, W. (2000): Critical examination of trace elements enrichments and depletions in soils: As, Cr, Ni, Pb and Zn in Swiss forest soils. *Science of the Total Environ.* 249, 257-280.
- Berrow, M.L. y Mitchell, R.L. (1991): Location of trace elements in soil profiles: total contents of particle-size separates. *Trans. Royal Soc. Edinburg: Earth Sciences* 82, 195-209.
- Bindler, R., Brännvall, M-L, Renberg, I. (1999): Natural lead concentrations in pristine boreal forest soils and past pollution trends: a reference for critical load models. *Envir. Sci. Technol.* 33, 3362-3367.
- Brookins, D. (1988): Eh-pH diagrams for geochemistry. Springer-Verlag, Berlin, 176 p.
- Buurman, P., García-Rodeja, E., Martínez Cortizas, A., van Doesburg, J.D.J. Stratification in European volcanic soils studied by laser-diffraction grain-sizing and chemical analysis. *Geoderma* (en prensa).
- Cheburkin, A.K. y Shotyk, W. (1996): An energy dispersive miniprobe multielement analyzer (EMMA) for direct analysis of Pb and other trace elements in peats. *Fress. Jour. Anal. Chem.* 345, 688-691.
- Chesworth, W., García-Rodeja, E., Martínez Cortizas, A., Macías Vázquez, F. (1998): Trace elements in podzols from Northern Spain. 16th International Congress of Soil Science, Montpellier, France.
- Espi, E., Boutron, C.F., Hong, S., Pourchet, M., Ferrari, C., Shotyk, W., Charlet, L. (1997): Changing concentrations of Cu, Zn, Cd and Pb in a high altitude peat bog from Bolivia during the past three centuries. *Water, Air Soil Pollut.* 100, 289-296.
- García-Rodeja, E., Fernández-Sanjurjo, M.J., Fernández-Vega, V. (1997): Input-output ion fluxes in the River Sor catchment (Galicia, NW Spain). *Chemosphere* 36, 1107-1112.
- Guitián Ojea, F. (Coord.) (1992): Atlas geológico de Galicia. Consellería de Industria e Comercio, Dirección Xeral de Industria, Xunta de Galicia.
- Görres, M. y Frenzel, B. (1997): Ash and metal concentrations in peat bogs as indicators of anthropogenic activity. *Water, Air Soil Pollut.* 100, 355-365.
- Hong, S., Candelone, J-P., Patterson, C.C., Boutron, C.F. (1996): History of ancient copper smelting pollution during Roman and Medieval Times recorder in Greenland ice. *Science* 272, 246-249.
- Hong, S., Candelone, J-P, Boutron, C. (1997): Changes in Zinc and Cadmium concentrations in Greenland ice during the past 7760 years. *Atmos. Environ.* 15, 2235-2242.
- Kabata-Pendias, A. y Pendias, H. (1992): Trace elements in Soils and Plants. CRC Press, Boca Raton, Florida, 365 p.
- Kempton, H., Görres, M., Frenzel, B. (1997): Ti and Pb concentrations in rainwater-fed bogs in Europe as indicators of past anthropogenic activities. *Water Air Soil Pollut.* 100, 367-377.
- Lichter, J. (1998): Rates of weathering and chemical depletion in soils across a chronosequence of Lake Michigan sand dunes. *Geoderma* 85, 255-282.
- Macías, F., Veiga Vila, A., Calvo de Anta, R. (1993): Influencia del material geológico y detección de anomalías en el contenido de metales pesados en horizontes superficiales de suelos de la Provincia de A Coruña. *Cuadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe* 18, 317-323.
- Martínez Cortizas, A. y Moares Domínguez, C. (1995): Edafología y Arqueología:

- estudio de yacimientos arqueológicos al aire libre en Galicia. Xunta de Galicia, Consellería de Cultura. 199 pp.
- Martínez Cortizas, A., Nóvoa Muñoz, J.C., Pontevedra Pombal, X., García-Rodeja, E., Llana Rodríguez, C. (1997a): Paleocontaminación. Evidencias de contaminación antrópica en Galicia durante los últimos 4000 años. *Gallaecia* 16, 7-22.
- Martínez Cortizas, A., Pontevedra Pombal, X., Nóvoa Muñoz, J.C., García-Rodeja, E. (1997b): Four thousands years of atmospheric Pb, Cd and Zn deposition recorder by the ombrotrophic peat bog of Penido Vello (Northwestern Spain). *Water Air Soil Pollut.* 100, 387-403.
- Martínez Cortizas, A. y Pérez Alberti, A. (Coords.) (1999): Atlas climático de Galicia. Xunta de Galicia.
- Martínez Cortizas, A., Fábregas Valcarce, R., Franco Maside, S. (2000): Evolución del paisaje y actividad humana en el área de Monte Penide (Redondela, Pontevedra): una aproximación metodológica. *Trabajos de Prehistoria* 57, 173-184.
- Martínez Cortizas, A., García-Rodeja, E., Weiss, D. (2002): Peat bog archives of atmospheric metal deposition. *Science Total Environ.* 292, 1-5.
- Moares Domínguez, C. (1997): Suelos policíclicos y su importancia en el estudio de la evolución edáfica en el NW peninsular, PhD thesis, Facultad de Biología, Universidad de Santiago de Compostela.
- Moares Domínguez, C., Taboada Rodríguez, T., García-Rodeja, E., Martínez Cortizas, A. (1996): Tendencias de la podsolización durante el Cuaternario reciente en áreas de montaña en <<Avances en la Reconstrucción Paleoambiental de las Áreas de Montaña Lucenses>>, A. Pérez Alberti y A. Martínez Cortizas (Eds). Diputación Provincial de Lugo, 121-135.
- Nriagu, J.O. (1996): A history of global metal pollution. *Science* 272, 223-224.
- Ramil Rego, P. (1992). La vegetación cuaternaria de las sierras septentrionales de Lugo a través del análisis polínico, PhD thesis, Fac. Biología, Universidad de Santiago.
- Schuetz, L. (1989). Atmospheric mineral dust – Properties and source markers en <<Paleoclimatology and Paleometeorology: Modern and Past Patterns of Global Atmospheric Transport>>, Leinen, M. y Sarnthein, M. (Eds.), 359-383.
- Schütz, L. y Rahn, K.A. (1982): Trace-element concentrations in erodible soils. *Atmos. Environ.* 16, 171-176.
- Shotyk, W., Cheburkin, A.K., Appleby, P.G., Frankhauser, A., Kramers, J.D. (1996): Lead in three peat bog profiles, Jura Mountains, Switzerland: enrichments factors, isotopic composition and chronology of atmospheric deposition. *Proceedings of the Workshop on Peat Bog Archives of Atmospheric Metal Deposition*, Berne, p. 28.
- Shotyk, W., Blaser, P., Grünig, A., Cheburkin, A.K. (2000): A new approach for quantifying cumulative, anthropogenic, atmospheric lead deposition using peat bog profiles. *Science Total Environ.* 249, 281-295.
- Taboada, T., García-Rodeja, J., Martínez Cortizas, A., García, C., García-Rodeja, E. (2001): Contenido y distribución de U y Th en suelos desarrollados a partir de rocas graníticas de Galicia. Conferencia Ibérica sobre Protección Ambiental, Viseu, Portugal.
- Wedepohl, K. (1995): The composition of the continental crust. *Geochim. Cosmochim. Acta* 59, 1217-1232.
- Weiss, D., Shotyk, W., Cheburkin, A. (1998): Determination of Pb in ashed peat plants using an energy-dispersive miniprobe multi-element analyzer (EMMA). *Analyst* 123, 2097-2102.
- West, S., Charman, D.J., Grattan, J.P., Cheburkin, A.K. (1997): Heavy metals in

Holocene peats from South West England: detecting mining impacts and atmospheric pollution. *Water Air Soil Pollut.* 100, 343-353.