

## RESPUESTA DE ALGUNOS SUELOS DE GALICIA AL APORTE DE UN ACIDO FUERTE

M. M. Urrutia, E. García-Rodeja y F. Macías

*Departamento de Edafología y Química Agrícola. Facultad de Biología.  
Universidad de Santiago de Compostela.*

### RESUMEN

Se realiza un primer experimento para conocer la respuesta de suelos de Galicia al aporte de un ácido fuerte ( $H_2SO_4$ ), estudiando sobre todo la cantidad de bases lixiviadas y la variación del pH del suelo. Se liberan bajas cantidades de cationes, superando raramente el valor de  $1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de suelo. Tanto la cantidad de bases perdidas como la eficacia de lixiviación se relacionan con el tipo de suelo, la Capacidad de Cambio de Cationes al pH del suelo, la saturación en bases y la reserva de minerales alterables. Se concluye que la alteración mineral contribuye a la liberación de iones, representando un factor importante para evaluar la sensibilidad al aporte de un ácido en un grupo de suelos de clima templado-húmedo.

Palabras clave: Lixiviación. Acido sulfúrico. Sensibilidad a la acidificación. Pérdida de bases. Alteración mineral. Lluvia ácida.

### SUMMARY

#### RESPONSE OF SOME SOILS OF GALICIA TO A STRONG ACID TREATMENT

A first experiment to determine the response of soils to additions of a strong acid was made in Galicia, paying attention to the amount of leached basic cations and soil pH variation. Leached base levels are low, surpassing the value of  $1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  in only a few cases. Total amount of leached bases and leaching efficiency are related to the type of soil, Cation Exchange Capacity at soil pH, Base Saturation of exchange complex and the pool of weatherable minerals. The main conclusion is that mineral weathering has a strong relevance in soils of humid-temperate climates in order to establish the sensitivity of soils to acid inputs.

Key word: Leaching. Sulfuric acid. Sensitivity to acidification. Base depletion. Mineral weathering. Acid rain.

### INTRODUCCION

La generalización del fenómeno de numerosos estudios acerca de su la deposición ácida ha dado lugar a efectos sobre los ecosistemas. E

efecto en los suelos, en particular, ha sido extensamente discutido, siendo la opinión más generalizada actualmente que este fenómeno actúa como un agente intensificador del proceso general de acidificación del suelo (Kennedy, 1986; Brandt, 1987). Varios son los efectos que la lluvia ácida puede producir en los suelos; entre ellos, cabe citar la pérdida de cationes alcalinos y alcalinotérreos por lixiviación, solubilización de Al y otros metales, alteración de la actividad microbiana y, en ocasiones, descenso del pH (McFee, 1980; Abrahamsen, 1984; Bergkvist, 1986; Boutin y Robitaille, 1987; Wright *et al.*, 1988; Frogner, 1990; entre otros).

Los parámetros determinantes de la "sensibilidad" de los suelos a los aportes por precipitación ácida son la entidad del Complejo de Cambio, su contenido en bases y el pH del suelo según McFee (1980) o Wang y Coote (1980). Así, McFee establece que serán sensibles los suelos de CIC menor que  $6.2 \text{ cmol}_e \text{ kg}^{-1}$  en los 25 cm superiores; ligeramente sensibles los de CIC entre 6.2 y  $15.4 \text{ cmol}_e \text{ kg}^{-1}$  y no sensibles aquellos con CIC superior a  $15.4 \text{ cmol}_e \text{ kg}^{-1}$ , además

de los suelos cultivados, los calcáreos o los hidromorfos. Con posterioridad, Reuss y Johnson (1986) diferencian tres tipos de criterios, según se considere la sensibilidad del suelo a la pérdida de bases, al descenso del pH o a la solubilización de Aluminio.

Sin embargo, muchas otras propiedades influyen de modo importante en la respuesta de un suelo ante el aporte de un ácido fuerte, sobre todo, la capacidad y velocidad de alteración mineral o la capacidad de retención de aniones (principalmente el sulfato) que, sin embargo, son propiedades difíciles de evaluar de modo rápido y por ello poco utilizadas.

En este trabajo se presentan los resultados de unos ensayos previos destinados a conocer la respuesta de diversos suelos de Galicia al aporte de un ácido fuerte, estudiando fundamentalmente la cantidad de bases lixiviadas, la variación de pH que provoca y su relación con algunas propiedades del suelo, a fin de comprobar la adecuación de los sistemas de evaluación de la sensibilidad a la acidificación basados únicamente en las características del complejo de cambio a los suelos de Galicia.

## MATERIAL Y METODOS

Dado que la respuesta a los aportes ácidos va a depender de las características del propio suelo, se han seleccionado 8 perfiles de suelos de Galicia con propiedades diferentes y desarrollados sobre distintos tipos de material geológico:

**Perfil "Gb":** *Andosol úmbrico* (FAO, 1988), *Dystrandept típico*

(Soil Taxonomy, 1975) desarrollado sobre **gabros**. Horizontes: Ah1, Ah2, AB, 2B.

**Perfil "Ar":** *Podsol brúnico* (FAO, 1988), *Haplorthod típico* (S. T., 1975) desarrollado sobre **sedimentos de arenisca ortocuarcítica**. Horizontes: A, E, Bh, Bs, C1, C2.

**Perfil "F":** *Gleysol úmbrico* (FAO,

1988), *Humaquept típico* (S. T., 1975) desarrollado sobre filitas. Horizontes: A, Bg, Cg.

Perfil "E": *Cambisol dístrico* (FAO, 1988, *Dystrochrept úmbrico* (S. T., 1975) desarrollado sobre esquistos del Complejo de Ordenes. Horizontes: A, Bw, C.

Perfil "Gr": *Cambisol úmbrico* (FAO, 1988), *Haplumbrept cumúllico* (S. T., 1975) desarrollado sobre granitos. Horizontes: Ah1 y Ah2.

Perfil "Cz": *Leptosol rendzico* (FAO, 1988), *Rendoll lítico* (S. T., 1975) desarrollado sobre calizas. Horizonte: A.

Perfiles "Arn1" y "Arn2": *Arenosol calcárico* y *Arenosol gleico* (FAO, 1988) desarrollados sobre sedimentos no consolidados de resistatos (cuarzo) con carbonatos biogénicos. Horizontes: Au1 y Au2 en Arn1 y A en Arn2.

#### -Lixiviación-

Se utiliza una simplificación del método de Huete y McColl (1984) consistente en lavar, en un tubo de percolación, 5 g de suelo con una disolución de  $H_2SO_4$  a pH 3.5 ( $1.58 \times 10^{-4}$  N), que representaría las condiciones más desfavorables esperadas experimentalmente; el la-

vado se efectúa, sin agitación y temperatura ambiente, con 100 mL de ácido añadidos de forma que el ritmo de percolación es de 20 mL  $h^{-1}$ . El lixiviado se recoge en dos fracciones de 50 mL (alícuotas 1 y 2); una vez recogida la primera alícuota se dejan transcurrir 30 minutos antes de iniciar la segunda fase de percolación. El pH de cada alícuota se mide una vez alcanzado el volumen requerido y, posteriormente, se determina el contenido en Ca, Mg, Na y K por espectrofotometría de Absorción Atómica.

Se realizan dos variantes del ensayo, en el primer caso (lixiviación I) dejando un tiempo de contacto de 16 horas entre el suelo y la disolución de  $H_2SO_4$  y sin tiempo de contacto previo en la segunda ocasión (lixiviación II).

Los resultados se expresan en  $cmol_c$  (cmol de carga)  $kg^{-1}$  de suelo se denomina *eficacia de la lixiviación* a la relación entre los moles de carga (+) de cationes lixiviados y los de protones añadidos.

Tras la percolación, el suelo se lava con agua, se seca al aire y se determina el pH en agua por el método usual (relación suelo: disolución 1:2.5 y 10 minutos de contacto según describen Guitián y Carballal (1976).

## RESULTADOS Y DISCUSION

### *Composición catiónica del lixiviado*

De todos los cationes medidos, el lixiviado en mayor cantidad (en  $mg\ kg^{-1}$ ) es el Na, seguido del Ca, K y Mg por este orden, excepto en los suelos con carbonatos, en los que el

Ca es el más abundante. Esta sucesión puede ser explicada por las características del Complejo de Cambisoles del suelo: el Na es el ión menos retenido por su relación carga/radio

y radio de hidratación; según estas propiedades, a continuación se liberarían K, Mg y Ca, por este orden, pero las concentraciones relativas de tales iones en el Complejo de Cambio pueden modificar la secuencia, de modo que se retiene el ión más escaso. Siendo el Ca más abundante en el Complejo de Cambio de estos suelos que el K y el Mg, se explica la secuencia de lixiviación hallada. En los suelos con carbonatos, en cambio, se produce fundamentalmente disolución de formas carbonatadas más que cambio iónico. Las cantidades que se liberan en la segunda alícuota son más bajas que en los primeros 50 mL, pero en igual secuencia.

Las cantidades totales de cationes lixiviadas, son bajas (Tabla 1); tan sólo superan el valor de 2  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$  en el perfil Arn2 y de 1  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$  en los otros horizontes de pH neutro o alcalino y casos concretos de los suelos ácidos. La menor cantidad total se libera en los horizontes C de suelos de areniscas y de filitas.

En comparación con la escasa liberación de bases, los valores de pH de los lixiviados son bastantes altos (Tabla 2). Una explicación sería que hubiesen sucedido procesos de adsorción o precipitación de sulfato, que liberan grupos  $\text{OH}^-$  a la solución (Parfitt y Smart, 1978); aunque otros autores opinan que los mecanismos más probables de adsorción de sulfato tienen lugar con moléculas de agua de coordinación, en cuyo caso no se liberan grupos  $\text{OH}^-$  (Zhang *et al.*, 1987).

Cuando no existe contacto previo entre el suelo y la disolución de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , se mantienen las secuencias de lixiviación, aunque se lavan canti-

dades menores de cationes. Salvo excepciones, se encuentran niveles muy parecidos a los del experimento I en los suelos con carbonatos; en los otros suelos se dan valores que varían desde similares a bastante menores de Ca, Mg y Na, e iguales o ligeramente superior para el K. La cantidad de bases más baja se da en el horizonte alábico del podsol y, como en la lixiviación I, en los horizontes C de los suelos de areniscas y filitas.

### *Eficacia de lixiviación*

La eficacia de lixiviación se entiende, en el sistema experimental seguido, como la capacidad de desplazamiento de cationes básicos que tienen los protones añadidos al suelo (moles de carga de bases/moles de  $\text{H}^+$ ). En las muestras estudiadas son superiores a 1 (Tabla 1) salvo en dos horizontes.

En la lixiviación I, considerando únicamente Ca, Mg y K, sólo se supera el valor de 1 en los suelos de pH neutro o alcalino, ricos en cationes en el Complejo de Cambio y en los que la presencia de carbonatos hace posible que se produzca también disolución de los mismos (Tabla 1). En cambio, en los suelos ácidos, las eficacias oscilan entre 0.16 y 0.93; Según Reuss y Johnson (1986), sólo en suelos de saturación en bases muy baja esta relación será mucho menor de 1.0. Sin embargo, el criterio de estos autores, según el cual la eficacia de desplazamiento de los  $\text{H}^+$  es tanto menor cuanto menor es la saturación del Complejo de Cambio (representado por la saturación en Ca), no se cumple en estos suelos, sino que es precisamente el efecto opuesto el que se manifiesta en los

TABLA 1

*Cantidades to tales de cationes lixiviados y eficacia de la lixiviación en los experimentos I y II.*

MUESTRA		LIXIVIACION I (16 h contacto)				LIXIVIACION II (sin contacto previo)			
		CATIONES cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>		EFICACIA *		CATIONES cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>		EFICACIA *	
		(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)
Gb	Ah1	1.12	0.31	1.77	0.72	0.66	0.22	1.05	0.64
	Ah2	0.64	0.20	1.02	0.49	0.62	0.13	0.98	0.39
	AB	0.86	0.22	1.35	0.46	0.48	0.07	0.76	0.19
	2B	0.67	0.09	1.06	0.16	0.75	0.04	1.19	0.10
Ar	A	0.88	0.29	1.39	0.70	0.40	0.14	0.63	0.40
	E	0.82	0.26	1.29	0.54	0.31	0.07	0.49	0.21
	Bh	0.98	0.32	1.54	0.73	0.61	0.16	0.96	0.45
	Bs	0.71	0.22	1.12	0.49	0.40	0.09	0.63	0.31
	C1	0.66	0.22	1.05	0.42	0.34	0.06	0.54	0.15
	C2	0.55	0.16	0.87	0.33	0.42	0.07	0.66	0.19
F	A	1.10	0.32	1.74	0.75	0.94	0.20	1.49	0.57
	Bg	0.94	0.24	1.49	0.47	0.49	0.09	0.77	0.22
	Cg	0.57	0.13	0.97	0.29	0.36	0.05	0.57	0.13
E	A	0.64	0.15	1.01	0.34	0.87	0.23	1.37	0.63
	Bw	0.92	0.18	1.45	0.36	0.63	0.27	1.00	0.74
	C	1.12	0.34	1.77	0.80	0.61	0.22	0.96	0.62
Gr	Ah1	0.90	0.37	1.42	0.93	0.45	0.07	0.71	0.20
	Ah2	0.96	0.38	1.52	0.79	0.34	0.06	0.54	0.15
Cz	A	1.39	0.83	2.20	1.36	1.32	0.92	2.09	1.50
Arn1	Au1	1.18	0.58	1.87	0.99	0.91	0.57	1.45	0.99
	Au2	1.06	0.60	1.68	1.09	0.99	0.58	1.57	1.03
Arn2	A	2.08	1.17	3.29	2.16	1.97	1.31	3.11	2.43

TABLA 2

*pH de los lixiviados y variación del pH del suelo tras la lixiviación I.*

MUESTRA	LIXIVIACION I		LIXIVIACION II		Variación del pH del suelo * (Lixiviación I)	
	(1)	(2)	(1)	(2)		
Gb	Ah1	5.8	4.9	5.5	5.5	+0.7
	Ah2	6.1	5.6	5.7	5.8	+0.4
	AB	6.4	5.9	6.0	5.8	-0.2
	2B	6.3	6.0	6.0	5.6	+0.3
Ar	A	5.6	5.2	5.3	4.9	+0.6
	E	6.4	5.0	5.7	4.3	-0.7
	Bh	5.3	5.1	4.9	5.3	+0.9
	Bs	5.9	5.4	5.5	5.0	-0.2
	C1	6.2	5.2	5.7	4.9	-0.4
	C2	6.3	6.2	5.8	5.5	+0.2
F	A	5.3	5.4	5.1	5.2	+0.8
	Bg	5.8	5.3	5.3	5.1	+0.4
	Cg	6.2	5.2	6.0	5.4	0.0
E	A	5.8	5.5	5.5	5.9	+0.1
	Bw	5.8	5.7	5.4	5.7	0.0
	C	6.0	5.7	4.9	5.6	-0.2
Gr	Ah1	5.5	5.3	5.0	6.0	+0.2
	Ah2	6.2	5.4	4.5	4.6	-1.0
Cz	A	7.1	7.0	6.9	6.7	+0.8
Arn1	Au1	7.4	7.1	7.1	6.9	+0.8
	Au2	7.3	7.2	7.2	7.1	+1.3
Arn2	A	7.7	7.7	7.8	7.5	+0.7

\* pH final-pH inicial (en agua, relación suelo: agua 1:2.5)  
(1) alícuota 1, (2) alícuota 2.

suelos ácidos de este experimento (Fig. 1).

Cuando no hay contacto previo (lixiviación II), las eficacias son menores en los suelos ácidos (entre 0.1 y 0.74), y similares a las de la lixiviación I en los suelos con carbonatos (Tabla 1); se sigue también la tendencia a crecer la eficacia cuanto

menor es la saturación en bases del Complejo de Cambio (Fig. 1).

Hay ciertas cuestiones que no son explicables sólo por intercambio iónico; el hecho más evidente lo constituyen las muestras con carbonatos, en las que los procesos de disolución predominan en el sistema, especialmente en los de carbonatos organógenos.

También en los demás suelos hay evidencias de que la alteración mineral está participando activamente: i) la secuencia de lixiviación de catio-

nes es idéntica al orden de movilidad geoquímica por alteración encontrado en Galicia ( $\text{Na}, \text{Ca} > \text{K}, \text{Mg}$ ) (García Paz y Macías, 1983; Macías

Eficacia  $(\text{Ca}+\text{Mg}+\text{K})/\text{H}$

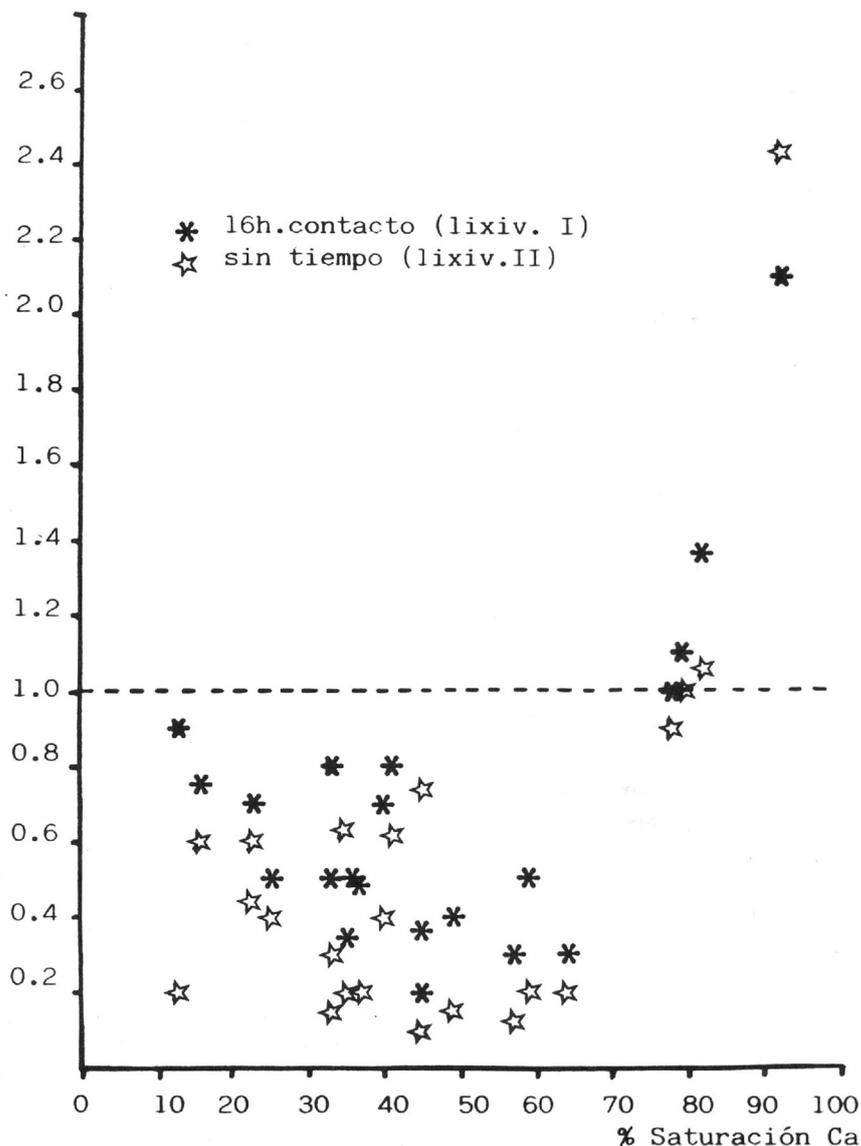


FIG. 1.—Relación entre la eficacia de lixiviación y la saturación en Ca del Complejo a Cambio, para los dos experimentos (lixiviaciones I y II).

1986; entre otros); ii) los horizontes que pierden menor cantidad de bases son los que carecen de minerales alterables (horizontes C de areniscas y filitas); iii) las eficacias de lixiviación en muestras con complejo de cambio muy saturado (Fig. 1), son siempre mucho mayores de lo que explicaría su saturación en cationes básicos. Todas estas evidencias sugieren que la alteración mineral, en climas templado-húmedos como el de Galicia, es mucho más importante de lo que tienen en cuenta la mayor parte de las consideraciones de sensibilidad realizadas en climas fríos, como el Norte de Europa, USA o Canadá.

### *Sensibilidad de los suelos*

Al considerar la sensibilidad al aporte ácido de un suelo, los criterios a seguir van a depender de si se considera la acidificación como un descenso del pH o como pérdida de Ca, Mg, Na y K en el Complejo de Cambio y predominio de cationes ácidos (Fe, Al,  $\text{NH}_4^+$  . . .). Puesto que en este experimento, se determinan exclusivamente las bases lixiviadas, se evaluará tan sólo la modificación del pH del suelo tras el aporte ácido y la magnitud de la pérdida de bases en el Complejo de Cambio del suelo.

#### **i.—Sensibilidad al cambio de pH**

De las 22 muestras de suelo, el pH (en agua, relación 1:2.5) es menor después del tratamiento con ácido en 6 muestras, de las cuales, tan sólo en 4 es entre 0.2 y 1.0 unidades de pH (Tabla 2): el horizonte E del Podsol, el horizonte Ah2 del Cambisol sobre granitos y, en menor grado, los horizontes C de los suelos de areniscas y de esquistos; tanto éstos como el horizonte eluvial son

materiales con baja capacidad de amortiguación y escasa cantidad de minerales alterables, en las areniscas por la naturaleza de la roca madre y en los de esquistos porque se han perdido en la fase de alteración que da lugar a la saprolita (Macías *et al.*, 1981); estos horizontes tienen también baja capacidad de cambio y escasa reserva de bases y/o materia orgánica. Por ello, el tratamiento ácido provoca pérdida de elementos en el lixiviado y da lugar a un descenso del pH del suelo. El horizonte Ah2 de granitos, también posee baja capacidad de cambio ( $3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) y pierde una importante cantidad de elementos básicos en la lixiviación, que parecen modificar de modo muy importante su sistema amortiguador, al menos en el tiempo y las condiciones que se plantean en este experimento.

Otros horizontes apenas ven modificado su pH tras el tratamiento (Tabla 2), mostrando variaciones entre  $\pm 0.2$  unidades de pH. En el resto de las muestras, el pH del suelo es mayor tras el tratamiento ácido que antes de él; los aumentos, que oscilan entre 0.2 y 1.3 unidades de pH, pueden ser provocados por el efecto del ácido sobre los minerales del suelo que, al debilitar sus estructuras, facilita la liberación de elementos a la solución.

Por consiguiente, los horizontes que han resultado ser sensibles al descenso del pH son los que tienen capacidad de cambio baja ( $< 3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ), están desaturados y, bien carecen de minerales alterables (horizonte álbico y saprolitas de areniscas y filitas) o bien han sufrido una fuerte pérdida de elementos, tanto del complejo de cambio como

por alteración mineral inmediata (horizonte Ah2 del Cambisol de granitos), en este caso, a pesar de su riqueza en materia orgánica (7%).

#### ii.—Sensibilidad a la pérdida de bases

Se ha calculado la relación entre Ca, Mg y K lixiviados y sus niveles en el Complejo de Cambio (Tabla 3). Esta proporción es un índice más adecuado de las pérdidas que ha sufrido el suelo que la cantidad total lavada, porque tiene en cuenta la magnitud inicial. Globalmente, en la lixiviación I, se supera el equivalente a un 20% de las bases de cambio en el Cambisol de granitos y en la saprolita de esquistos. Valores próximos (18%) tiene el horizonte A de filitas. Las pérdidas son poco importantes en términos relativos en los suelos más saturados (perfiles Cz y Arn2) (Tabla 3).

Si se expresan las cantidades de cada catión que han sido lavadas respecto a las cambiables al pH del suelo (con  $\text{BaCl}_2$  0.33M no tamponado) (Tabla 3), se aprecia como el Ca y el Mg parecen ser retenidos con mayor energía por el Complejo de Cambio, alcanzándose siempre valores de lixiviación inferiores al 15% de su contenido inicial. En los suelos más saturados en Ca es donde la lixiviación es menos significativa (perfiles Cz y Arn2 o perfil Gb). Para el Mg, se alcanzan valores máximos en torno a un 28% en el horizonte AB del Andosol, la saprolita de esquistos o el perfil Arn1. El K, en cambio, presenta tasas mucho más altas, que en algunos suelos superan el 100%: es decir, se lixivía más K que el cambiable, lo que indica que se está produciendo alteración mineral; este efecto tiene lugar en los suelos

más pobres en bases de cambio: Cambisol de granitos, el suelo de filitas y el Podsol. Los minerales afectados pueden ser, por tanto, micas o feldspatos, muy abundantes en estos suelos. La mayor proporción se libera en la primera alícuota, tras las 16 horas de contacto, disminuyendo en los 50 mL finales.

Cuando no existe contacto previo las tasas de lixiviación son inferiores en los horizontes que sufren pérdidas mayores son los del Arenosol sin materia orgánica (Arn1), los del Cambisol de esquistos y el horizonte A de filitas. La tasa de lixiviación de cada catión respecto al contenido en el Complejo de Cambio también disminuye respecto al experimento I. El K lixiviado supera de nuevo el existente en el Complejo de Cambio en el suelo de granitos, en el Podsol y en los horizontes A y Bg del Cambisol de filitas.

Las pérdidas globales de cationes en relación a los existentes en el Complejo de Cambio, se resumen en la Tabla 4. En el experimento I (16 horas de contacto) los suelos más sensibles a la pérdida de bases son el Cambisol úmbrico sobre granitos, el horizonte A del Gleisol de filitas y el C del suelo de esquistos, que pierden cantidades equivalentes a más del 18% de las bases del Complejo de Cambio. Les seguirían, con pérdidas próximas al 15%, el Arenosol sin materia orgánica (Arn1), el Podsol y el horizonte AB de gabros. Mucho menos sensibles son los suelos con elevada saturación (perfiles Cz y Arn2); las pérdidas más importantes de perfil Arn1, a pesar de su riqueza en carbonatos, se deben a que carece prácticamente de coloides, tiene baj

TABLA 3

*Cationes de cambio (K+Ca+Mg), Capacidad de Intercambio Catiónico efectiva de los suelos y relación entre la cantidad de cationes lixiviados y su cuantía en el complejo de cambio en las lixiviaciones I y II.*

MUESTRA	CC*	CICe&	LIXIVIACION I#				LIXIVIACION II#				
			Total	Ca	Mg	K	Total	Ca	Mg	K	
Gb	Ah1	3.18	9.55	9.8	5.6	9.4	25	6.9	0.8	4.1	32
	Ah2	1.72	5.42	11.6	4.8	12.4	89	7.5	1.1	4.2	94
	AB	1.42	3.30	15.5	9.8	27.7	71	4.9	1.0	7.0	51
	2B	1.68	3.08	5.3	4.1	6.9	38	2.4	0.6	1.7	51
Ar	A	2.56	5.04	11.3	5.5	7.2	144	5.5	0.5	1.8	117
	E	1.98	2.73	13.1	9.4	9.4	102	3.5	1.1	1.4	70
	Bh	2.49	8.59	12.8	6.2	10.7	149	6.4	0.7	3.2	128
	Bs	1.64	3.95	13.4	8.8	9.5	72	5.5	1.7	3.8	38
	C1	1.57	2.64	14.0	11.5	11.4	92	3.8	1.7	1.9	71
	C2	1.71	2.20	9.3	5.7	6.2	140	4.1	1.6	1.6	128
F	A	1.76	7.54	18.2	9.3	10.4	132	11.4	1.9	6.6	128
	Bg	2.06	4.88	11.6	8.1	17.1	140	4.4	1.8	5.7	115
	Cg	1.20	1.75	10.8	7.2	18.2	102	4.1	2.2	0.0	77
E	A	2.14	4.58	7.0	4.7	5.0	51	10.7	1.9	7.9	141
	Bw	1.92	3.11	9.4	8.4	5.6	21	14.1	2.8	6.9	93
	C	1.58	2.94	21.5	10.2	25.5	84	13.9	2.9	4.7	87
Gr	Ah1	1.46	9.45	25.3	9.3	18.7	367	4.8	0.6	2.1	94
	Ah2	1.14	3.03	33.3	11.5	20.8	897	5.2	2.7	3.5	153
Cz	A	29.88	30.54	2.8	2.4	4.2	32	3.1	2.6	5.3	32
Arn1	Au1	3.60	4.12	16.1	14.6	22.2	46	15.8	14.7	18.1	51
	Au2	3.76	4.30	16.0	13.5	24.0	82	15.4	13.4	24.0	66
Arn2	A	24.44	25.31	4.8	3.9	9.5	95	5.4	4.2	10.4	115

\* CC: cationes de cambio,  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ .

& CICe: capacidad de intercambio catiónico,  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$

# Relación (catión lixiviado/catión cambio)  $\times 100$ , para Ca, Mg, K y el total (Ca+Mg+K).

capacidad de cambio al pH del suelo y baja saturación.

El tiempo de contacto suelo:disolución es muy importante en las consideraciones acerca del efecto del

ácido en el suelo, destacando el importante descenso en la cantidad de bases que se lixivian cuando no hay contacto previo, sobre todo en los suelos ácidos y desaturados.

TABLA 4

*Síntesis de los niveles de pérdida de bases obtenidos experimentalmente y grado de sensibilidad que se deriva de la aplicación de criterios basados en las características del complejo de cambio.*

MUESTRA		PERDIDA DE BASES (%) <sup>#</sup>				SENSIBILIDAD		
		LIXIVIACION I			LIXIV. II		McFee <sup>+</sup>	R&J*
		<10	10-25	25-30	<10	10-25		
Gb	Ah1	X			*		LS	SPB
	Ah2		X		*		S	SPB
	AB		X		*		S	SPB
	2B	X			*		S	SPB
Ar	A		X		*		S	SPB
	E		X		*		S	SPB
	Bh		X		*		LS	SPB
	Bs		X		*		S	SPB
	C1		X		*		S	SPB
	C2	X			*		S	SPB
F	A		X			*	LS	SPB
	Bg		X		*		S	SPB
	Cg		X		*		S	SPB
E	A	X				*	S	SPB
	Bw	X				*	S	SPB
	C		X			*	S	SPB
Gr	Ah1			X	*		LS	SPB
	Ah2			X	*		S	SPB
Cz	A	X			*		NS	NS
Arn1	Au1			X		*	S	SPB
	Au2		X			*	S	SPB
Arn2	A	X			*		NS	NS

# Relación (cationes lixiviados/cationes cambiables) × 100.

+ Según criterios de McFee (1980): NS: no sensibles; LS: ligeramente sensibles; S: sensibles.

\* Según criterios de Reuss y Jhonson (1986): SPB: sensible a la pérdida de bases; NS: no sensible.

### *Comparación con las clasificaciones de sensibilidad basadas en el Complejo de Cambio*

Si se comparan estos resultados experimentales con las clasificaciones basadas en el Complejo de Cambio (McFee, 1980; Reuss y Johnson, 1986, entre otros) (Tabla 4), se aprecia que la entidad y la saturación en bases de éste no son datos suficientes para predecir el comportamiento de suelos ácidos que tienen minerales alterables, capaces de ceder elementos ante el aporte de un ácido fuerte.

Destaca también la influencia del método, tanto en los resultados cuantitativos, como en los límites que se establezcan para clasificar la sensibilidad de un grupo de suelos. Esto obliga a que la sensibilidad se evalúe tan sólo de un modo comparativo entre el conjunto de suelos en estudio, en vez de realizar una cuantificación; este hecho plantea, en suelos de la naturaleza de los aquí estudiados, la necesidad de realizar estudios concretos, ya que las estimaciones a priori no parecen resultar muy acertadas.

## CONCLUSIONES

En síntesis, los resultados obtenidos en este trabajo indican que los procesos de alteración mineral contribuyen de forma importante a la liberación de iones en suelos sometidos a la acción de ácidos fuertes, por lo que las características del complejo de cambio de los suelos (generalmente capacidad de intercambio de cationes y saturación en bases), comúnmente utilizadas para evaluar su sensibilidad a la acidificación, no son datos suficientes para predecir el comportamiento de suelos ácidos frente a este tipo de aportes.

De los experimentos de lixiviación destacan las siguientes observaciones:

— Con la excepción de los horizontes con carbonatos, cuya disolución explica que el Ca sea el catión más abundante, se obtiene una secuencia de lixiviación ( $\text{Na} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Mg}$ ) similar al orden de movilidad

geoquímica encontrada en medios de alteración de Galicia.

— La eficacia de la lixiviación en los suelos ácidos tiende a ser mayor cuanto menor es la saturación en bases del complejo de cambio, comportamiento contrario al propuesto por Reuss y Johnson (1986). Por otra parte, en muchos casos la eficacia en la neutralización de ácidos es superior a la que se podría explicar por su saturación en bases, lo que sólo se justifica por la intervención de elementos distintos a los cambiables, probablemente procedentes de reacciones de hidrólisis de minerales primarios alterables.

— Los cationes Ca y Mg parecen ser los retenidos con mayor energía por el complejo de cambio, mientras que en algunos horizontes, normalmente los más pobres en bases, se lixivian una cantidad de K mayor que la cambiante, indicando también la

acción de los procesos de alteración mineral.

— Los horizontes más sensibles al descenso de pH son los que poseen baja capacidad de cambio, están desaturados y carecen de minerales alterables.

— La sensibilidad a la pérdida de bases es menor en los suelos más saturados, pero está muy influenciada por las condiciones de experimentación, lo que limita las posibilidades de realizar estimaciones a priori del comportamiento de otros suelos.

## BIBLIOGRAFIA

- ABRAHAMSEN, G., 1984. Effects of acidic deposition on forest soil and vegetation. *Phil Trans. R. Soc. Lond.*, B. 305: 369-382.
- BERGKVIST, B., 1986. Leaching of metals from a spruce forest soil as influenced by experimental acidification. *Water, Air & Soil Pollution*, 31: 901-916.
- BOUTIN, R. and ROBITAILLE, G., 1987. Effects of endogenous and exogenous sources of acidification on the chemical properties of a podzol. In: *Acid Rain: Scientific and Technical Advances*, Pub. Div. Selper Ltd. London. 429-436.
- BRANDT, C. J., 1987. Acid Precipitation: Formation and impact on terrestrial ecosystems. Project Group "Acidic Precipitation", 1983. Verein Deutscher Ing.
- FAO, 1988. Revisión of the legend of the Soil Map of the World. UNESCO, Roma.
- FROGNER, T., 1990. The effect of acid deposition on cation fluxes in artificially acidified catchments in western Norway. *Geochim et Cosmochim. Acta*, 54: 769-780.
- GARCIA PAZ, C. y MACIAS, F., 1983. Evolución geoquímica de las rocas gabroicas de Galicia durante su meteorización. *Cuad. Lab. Xeol. Laxe*, 6: 255-280.
- GUITIAN, F. y CARBALLAS, T., 1976. Técnicas de análisis de suelos. Pico Sacro. Santiago de Compostela.
- HUETE, A. R. and McCOLL, J. G., 1984. Soil cation leaching by "Acid Rain" with varying nitrate-to-sulfate ratios. *J. Environ. Qual.*, 13: 366-371.
- KENNEDY, I. R., 1986. Acid soil and acid rain. The impact on the environment on nitrogen and sulphur cycling. In: *Research Studies in Botany and Related Applied Fields*. Nutman P. S. Ed. Ser. 2, Res. Stud. Press Ltd. John Wiley & Sons Inc. New York.
- MACIAS, F., 1986. Materiais orixinais e solos de Galiza. *Cuad. Sem. Sargadelos*, 47 "O Meio Natural Galego", 47-79.
- MACIAS, F., GARCIA PAZ, C., GIMENEZ, M. y VILLAR, M. C., 1981. El factor material de partida de los suelos de las Mariñas. 2. Alteración de los esquistos en medio bien drenados. *Acta Científica Compostelana*, 17: 265-291.
- McFEE, W. W., 1980. Effects of atmospheric pollutants on soils. In: "Polluted Rain" Toribara, T. Y., Miller, M. W. and Morrow, P. E. (Eds). *Env. Sci. Res. Ser.*, 17: 307-323.
- PARFITT, R. L. and SMART, R. St. C., 1978. The mechanism of sulfate adsorption on iron oxides. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42: 48-50.
- REUSS, J. O. and JOHNSON, D. W., 1986. Acid deposition and the acidification of soil and waters. *Ecological Studies*, 59. Springer-Verlag Pub. Co., New York.