

## CONSECUENCIAS DE LAS PRÁCTICAS DE MANEJO EN LA CALIDAD FÍSICA DE SUELOS ALTAMENTE AGREGADOS DE TENERIFE

S. ARMAS-ESPINEL<sup>1</sup>, C. M. REGALADO<sup>2</sup>, J. M. HERNÁNDEZ-MORENO<sup>\*1</sup>

<sup>1</sup> Dept. Edafología-Geología, Ave. F. Sánchez, s/n, 38204 La Laguna, Tenerife

<sup>2</sup> ICIA, Apdo. 60, 38200 La Laguna, Tenerife.

\* Autor de contacto. Tel.: +34-922-318364; fax: +34-922-318311. E-mail: jhmoreno@ull.es

**Abstract.** Andic materials and sesquioxides have a positive aggregating effect on soil structural degradation processes. This is relevant to volcanic zones where soils present both variable-charge components and layer silicates. In this work, the effects of soil management practices, specially the irrigation with sodium hazard waters, on physical soil quality were studied in soils with a range of Andic properties in different situations of salinity and sodicity. This study was based on previous work relating soil properties with the reduction of hydraulic conductivity, which is the final consequence of swelling and dispersion processes. Advantage was taken of the seasonal variability of soil physical-chemical properties to perform a temporal sampling. The results showed that for amorphous materials contents equivalent to aluminium-oxalate contents lower than 3 %, some interactions between salinity and exchangeable cations could lead to important reductions of saturated hydraulic conductivity, suggesting that the aggregating effect of such materials could not counterbalance the structure deterioration due to layer silicate components.

**Key words:** Structural degradation, Andic properties, Salinity, Sodicity.

**Resumen.** Los materiales ándicos y los sesquióxidos presentan una acción agregante muy positiva frente a los procesos de degradación estructural de los suelos. Este efecto es de especial relevancia en zonas volcánicas donde con frecuencia los componentes de carga variable coexisten con los filosilicatos. En este trabajo se estudian los efectos de las prácticas de manejo, especialmente el riego con aguas con riesgo de sodificación, en la calidad física de suelos de la isla de Tenerife que presentan un rango de propiedades ándicas. Este estudio se basa en trabajos previos que relacionan diferentes propiedades del suelo con la reducción de su conductividad hidráulica, consecuencia última de los procesos de hinchamiento y dispersión. Para ello, se han aprovechado las variaciones estacionales que se producen en las propiedades físico-químicas de los suelos durante el cultivo, para llevar a cabo un muestreo temporal. Los resultados muestran que a contenidos de materiales amorfos equivalentes a aluminio-oxalato amónico inferiores al 3 %, la interacción entre salinidad y cationes de cambio puede conducir a una reducción muy importante de la conductividad hidráulica saturada, lo que sugiere que el efecto

agregante de los materiales ándicos no puede contrarrestar el deterioro estructural debido a los minerales de arcilla.

**Palabras clave:** Degradación estructural, Propiedades ándicas, Salinidad, Sodicidad.

## INTRODUCCIÓN

En las Islas Canarias los cultivos de exportación se sitúan en las zonas bajas donde los suelos se encuentran generalmente degradados o erosionados. De ahí que se transporten suelos con propiedades muy favorables para los cultivos desde las zonas altas o de medianías para construir terrenos de cultivo artificiales o “sorribas”. Los suelos que se transportan presentan generalmente características ándicas. Al no realizarse una selección, se mezclan horizontes superficiales con horizontes B y piroclastos alterados durante la creación de la sorriba. Asistimos por lo tanto a la creación de un nuevo medio edáfico bajo un clima más cálido y árido y sometido a una elevada fertilización y riegos con aguas de mala calidad que se traducen en cambios notables de las propiedades físico-químicas y biológicas de los suelos y, según las prácticas de manejo, en un alto potencial de degradación de los mismos. De hecho, la propia preparación de las sorribas constituye un primer estadio de degradación de este tipo de suelos muy sensibles a la desecación (Dorel *et al.*, 2000).

Por otra parte, estos suelos contienen componentes amorfos (alofana, oxihidróxidos de Fe y Al) y filosilicatos que responden de forma muy diferente a los procesos de degradación. Los primeros poseen una fuerte acción agregante que determina unas buenas propiedades estructurales, tales como la estabilidad de agregados y la reducción del hinchamiento asociado a los minerales de arcilla (El-Swaify, 1975). Diversos trabajos, en los que se comparan los rangos de permeabilidad obtenidos antes y después de eliminar estos compuestos de las muestras de suelo, corroboran esta acción estabilizan-

te o protectora de la estructura, en suelos con distintas texturas de Hawái (McNeal *et al.*, 1968; El-Swaify *et al.*, 1969). Este efecto también se ha puesto de manifiesto en suelos arenosos a los que se les ha añadido óxidos de Fe y Al sintéticos (Shainberg *et al.*, 1987; Keren y Singer, 1989).

Las propiedades ándicas se evalúan actualmente a través de unos parámetros de diagnóstico, que se utilizan a nivel taxonómico y de capacidad de uso de los suelos en la Clasificación Americana (Soil Survey Staff, 1998) y la FAO (1998). Estos parámetros son: Contenidos de Al y Fe extraídos con oxalato amónico ácido ( $Al_o$ ,  $Fe_o$ ), que reflejan las cantidades de aluminio y hierro asociados a los citados componentes amorfos, la retención de fosfato ( $\Delta P$ ), como una medida de su reactividad química, y la densidad aparente ( $\rho_b$ ).

La bibliografía sobre el efecto del riego con aguas de baja calidad o depuradas en las propiedades físicas de los suelos es extensa (Cook *et al.*, 1994; Balks *et al.*, 1998; Magesan *et al.*, 1999; Halliwell *et al.*, 2001; Sparling *et al.*, 2001). Sin embargo, en Canarias son escasos los trabajos que estudien la contribución de los materiales ándicos a las propiedades físicas de los suelos en relación con el manejo de éstos. En un trabajo reciente, Armas *et al.* (2003) evaluaron algunas propiedades relevantes de la calidad física de suelos cultivados de la Isla de Tenerife en diferentes situaciones de salinidad y sodicidad en función de los parámetros de diagnóstico de las propiedades ándicas y del contenido y tipo de minerales de arcilla. Estos autores encontraron una serie de propiedades físicas covariantes con el parámetro  $Al_o$ , destacando los índices de agregación, la distribución de tamaño de

poros y la conductividad hidráulica saturada. Por encima de un 3 % de  $Al_0$  no se encontraron casos de degradación estructural. Sin embargo, por debajo de estos valores, determinadas combinaciones de cationes cambiables, salinidad y mineralogía de arcillas podían conducir a reducciones muy importantes de la conductividad hidráulica. En el presente trabajo tratamos de validar el modelo multivariante descrito por Armas *et al.* (2003). Para ello, se han aprovechado las variaciones estacionales que se producen en las propiedades físico-químicas de los suelos durante el cultivo, llevando a cabo un muestreo temporal.

## MATERIAL Y MÉTODOS

**Suelos:** Los suelos seleccionados proceden de 4 fincas de platanera representativas del norte (suelo 1) y sur (suelos 2, 3 y 4) de la isla de Tenerife, con distintas condiciones de manejo y sistema de riego, y que han sido descritos por Armas *et al.* (2003).

Las fincas con los suelos 2, 3 y 4 están dedicadas al cultivo de la platanera bajo invernadero de malla (alrededor de 1000 m<sup>2</sup>) con riego por goteo, salvo la finca con el suelo 2, con riego por microaspersión. En el riego se aplican distintas proporciones de agua residual depurada. En el caso de la finca con el suelo 1, se trata de un invernadero de plataneras con cubierta plástica y riego por goteo. En todos los casos los suelos han sido transportados desde las zonas de medianías.

Por su origen, estos suelos “sorribados” presentan en general texturas finas y una estructura bien desarrollada. En estas fincas, se viene realizando un seguimiento de las propiedades químicas y físicas de los suelos así como de la composición del agua de riego, dentro de un convenio de colaboración entre el Organismo Autónomo Local Balsas de Tenerife (BALTEN) y el Departamento de Edafología y Geología de la Universidad de La Laguna. Las características físicas y químicas principales de estos suelos se resumen en la Tabla 1 y 2, y se describen con mayor detalle en Armas *et al.* (2003). Los suelos 1 y 3 presentan condiciones salinas, mientras que en el suelo 2, se observan valores de conductividad eléctrica (CE) alrededor de 2 dS·m<sup>-1</sup> o incluso por debajo en algunos muestreos. Los valores de saturación de Na intercambiable (PSI) son elevados (> 15 %) en los suelos 3 y 4. En general todas las fincas presentan valores de pH dentro del rango alcalino, salvo el suelo 1, con valores próximos a 7. Los contenidos medios en fósforo Olsen son variables entre los distintos suelos (Tabla 1) con niveles elevados.

Los suelos se han numerado en orden decreciente de sus propiedades ándicas según los valores recogidos en la Tabla 2: 1 (finca Pajalillos) > 2 (finca B) > 3 (finca F) > 4 (finca X) y pueden clasificarse como Haplic Torriarents (Soil Survey Staff, 1998) o Aric Antrosols (FAO, 1998) con características ándicas. El suelo n° 1 cumple los requisitos de Andisol salvo por los valores

**TABLA 1.** Características químicas generales de los suelos (media ± error típico).

Suelo	pHext	CE	Ca	Mg	K	Na	P Olsen	M.O.
		(dS·m <sup>-1</sup> )	(cmolc·kg <sup>-1</sup> )				(mg·kg <sup>-1</sup> )	(g·kg <sup>-1</sup> )
1	7.0±0.1	4.7±0.5	14.2±0.5	5.8±0.2	2.8±0.1	4.3±0.4	52±19	23.3±0.7
2	7.7±0.1	2.0±0.1	26.3±1.0	16.3±0.7	6.4±0.4	4.5±0.3	111±7	26.0±1.8
3	7.5±0.1	8.1±0.7	20.9±0.6	11.8±0.7	8.5±0.5	10.2±0.5	117±8	34.7±2.8
4	7.7±0.1	2.5±0.2	9.2±0.4	10.3±0.4	1.2±0.1	8.1±0.7	59±5	25.3±1.5

**TABLA 2.** Propiedades ándicas, contenidos volumétricos de agua y conductividad hidráulica saturada en campo (media  $\pm$  error típico).

Suelo	$r_b$	(Al <sub>O</sub> +1/2 Fe <sub>O</sub> )	DP	q <sub>s</sub>	q <sub>1/3bar</sub>	q <sub>15bar</sub>	K <sub>s</sub> <sup>1</sup>
	(g·cm <sup>-3</sup> )			(%)			(mm·h <sup>-1</sup> )
1	0.84±0.01	4.4±0.3	80.0±2.5	64.2±0.3	39.6±0.5	28.8±0.4	35.4±3.7
2	0.99±0.01	2.2±0.1	74.2±0.9	65.0±0.5	48.1±0.9	34.5±0.6	10.3±23.5
3	1.01±0.01	2.4±0.2	62.5±1.2	64.4±0.8	42.5±0.8	30.1±0.4	26.5±12.8
4	1.08±0.03	2.2±0.2	68.9±5.4	59.4±0.9	42.6±1.1	30.2±0.8	30.0±23.9

<sup>1</sup> Media geométrica  $\pm$  error típico.

de  $\Delta P$ , atribuible a la saturación parcial de la capacidad de retención de P. Las texturas son franco-arcillosas o más finas. En esta misma secuencia disminuye la estabilidad de agregados (Armas *et al.*, 2003) por el método de la resina (Bartoli *et al.*, 1988).

Se realizaron 12 muestreos estacionales en el periodo 2000-2003 para las propiedades químicas (130 muestras) y 5 para las propiedades físicas (90 muestras) asociados a las estaciones de invierno, verano y otoño. Los muestreos se llevaron a cabo en superficie (0-15 cm) y en profundidad (15-30 cm).

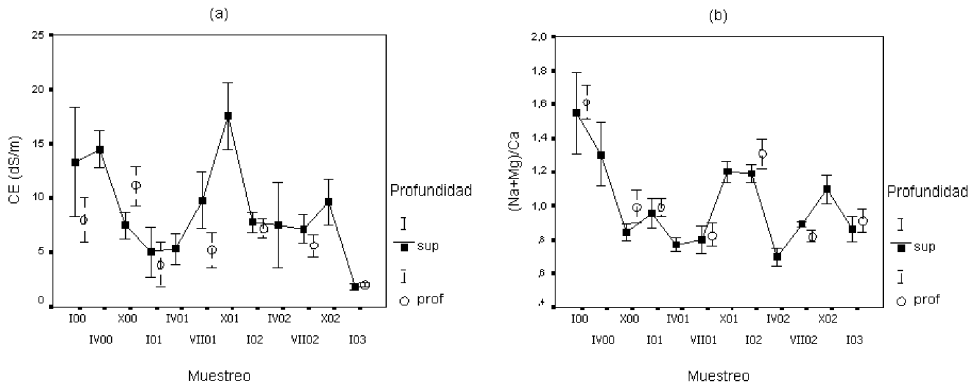
**Métodos:** *Propiedades ándicas:* La densidad aparente ( $\rho_b$ ) se determinó por el método del anillo y los materiales amorfos mediante extracción con oxalato amónico (Al<sub>O</sub>, Fe<sub>O</sub> y Si<sub>O</sub>) y la retención de P ( $\Delta P$ ) según Blakemore *et al.* (1981). *Características de retención de agua:* Los contenidos volumétricos de humedad a 1/3 ( $\theta_{1/3}$ ) y 15 bar ( $\theta_{15}$ ) se determinaron en anillos de 96.6 cm<sup>3</sup>, en placas de presión de Richards (Klute, 1986). Se definió el parámetro ( $\theta_S-\theta_{1/3}$ ) como un índice de la proporción de macro y mesoporos. *Conductividad hidráulica saturada* (K<sub>s</sub>): En laboratorio, mediante el permeámetro de carga constante Eijkelkamp en los mismos anillos de muestras inalteradas (Klute, 1986), en campo, con el permeámetro de Guelph (Reynolds *et al.*, 1985). Se utilizó la clasificación de K<sub>s</sub> por categorías de la FAO (1963): Muy baja (< 8 mm/h), baja (8-

20 mm/h), moderada (20-60 mm/h), moderadamente rápida (60-80 mm/h), rápida (80 – 125 mm/h) y muy rápida (> 125 mm/h).

Los cationes solubles, conductividad eléctrica (CE) y pH se determinaron en el extracto de saturación. Los cationes de cambio por el método del acetato amónico (1N, pH = 7). El análisis estadístico se realizó con el programa SPSS (1999).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las fincas estudiadas han sido regadas durante años con aguas bicarbonatadas de diferente salinidad, lo que ha dado lugar, junto con las prácticas de manejo, a variaciones importantes de algunas de las principales propiedades de los suelos: pH, salinidad, porcentaje de saturación de Na intercambiable (PSI), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y modificación de sus propiedades ándicas. Se ha observado una variación estacional en algunas propiedades químicas relevantes de los suelos, destacando la CE y la distribución de cationes de cambio. La CE presenta mínimos en invierno y primavera, que se corresponden con un descenso en la salinidad de las aguas de riego y que ha coincidido con años de elevada pluviometría durante estas estaciones. Los valores de la relación de adsorción de Na (SAR) y PSI también han presentado variaciones estacionales significativas. Como ejemplo, en la



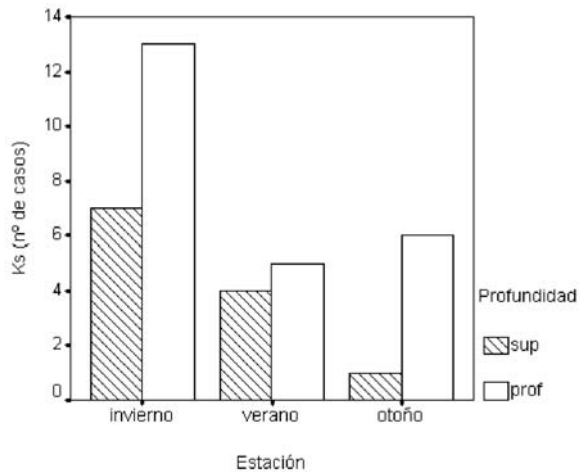
**FIGURA 1.** Valores medios de la variación estacional de (a) la CE del extracto de saturación y (b) de la relación (Ca+Mg)/Na cambiables en el suelo 3 por profundidad. Las barras representan el error típico. En el eje de categorías, el mes (romano) y los dos últimos dígitos del año.

Figura 1 se muestran las variaciones de CE y de la razón entre los cationes de cambio (Na+Mg)/Ca para el suelo 3. Se ha utilizado este parámetro, que resultó ser más significativo que el PSS en relación con la disminución de  $K_s$ , según Armas *et al.* (2003). En este sentido se ha citado que el Mg puede aumentar el hinchamiento para un valor dado de ESP (Emerson, 1977). El papel del Mg es en todo caso complejo, pudiendo tener un efecto negativo directo (“efecto específico”) o bien indirecto (favoreciendo una mayor absorción de Na) sobre la estabilidad estructural y  $K_s$  (Abder-Rahman y Rowell, 1979; Rengasamy *et al.*, 1986).

Durante el periodo de estudio se ha observado una mayor incidencia de los casos con categorías de  $K_s$  “muy baja” en el periodo invernal (Fig. 2). Este descenso es consistente con el descenso de CE y el aumento relativo de Na y Mg cambiables. Como se cita ampliamente en la bibliografía, la combinación de baja salinidad y alta sodicidad (provocada por el agua de riego o por el lavado del agua de lluvia) da lugar a procesos de hinchamiento y dispersión de

arcillas, con la consecuente reducción de la permeabilidad (McNeal y Coleman, 1966; Frenkel *et al.*, 1978).

En el citado trabajo de Armas *et al.* (2003), se estudió la influencia de las propiedades ándicas, niveles de salinidad y sodicidad y rangos de porosidad en la conductividad hidráulica por medio de un análisis multivariante de componentes principales (ACP). El componente 1,  $C1 = 0.9 (w_s - w_{1/3}) + 0.7 Al_0 + 0.2 CE + 0.2 w_{15} - 0.7$

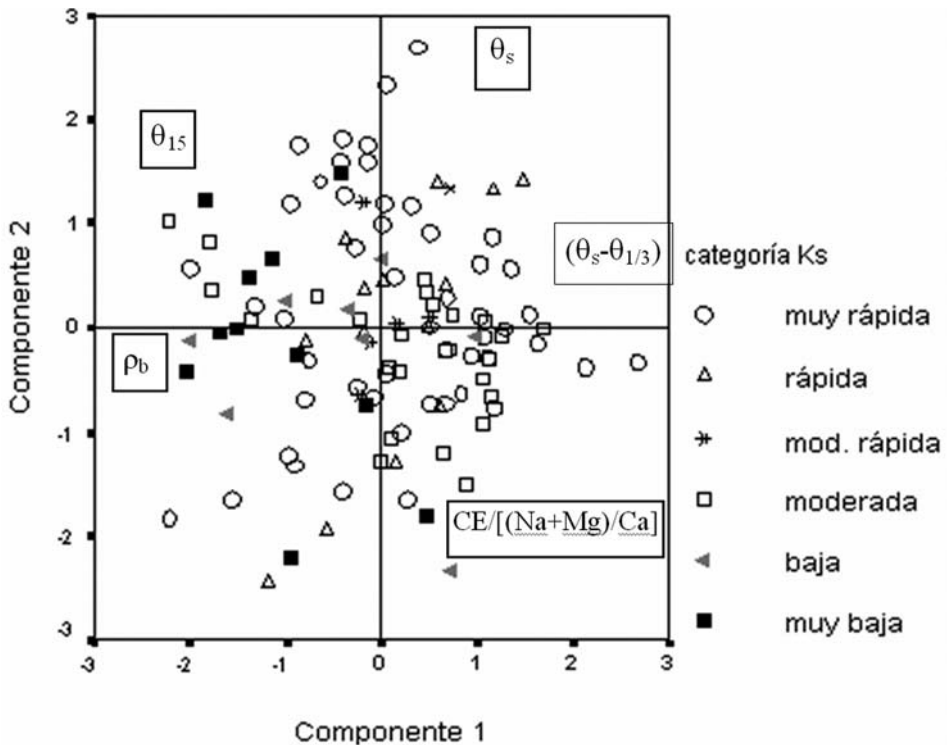


**FIGURA 2.** Frecuencia de casos de conductividad hidráulica en campo “muy baja” (población total de 67) por profundidad y por estaciones para el conjunto de las fincas.

$w_{r15} - 0.6 [(Na+Mg)/Ca]$ , discriminó los puntos con permeabilidad “muy baja”, que presentaron siempre valores negativos. Este componente muestra por una parte el efecto positivo en la agregación de  $Al_0$  (relacionado positivamente con macro y mesoporosidad ( $w_s-w_{1/3}$ ), diferencia entre los contenidos gravimétricos de agua a saturación y a 1/3 bar) favorecida por el efecto floculante de CE, y por otra, el efecto negativo del hinchamiento y dispersión (Na, Mg) asociado a una elevada microporosidad relativa ( $w_{r15}$ , relación entre los contenidos gravimétricos de agua a 15 y a 0.01 bar). En cuanto al  $Fe_0$ , no tuvo influencia significativa aparente, debido probablemente a que presenta un rango de valores similar en todos los suelos.

Considerando estos resultados, realizamos un nuevo análisis de componentes prin-

cipales incluyendo los puntos de los muestras temporales. Teniendo en cuenta que en las Islas Canarias los parámetros  $Al_0$  y  $Fe_0$  no se utilizan normalmente en la caracterización de los suelos de cultivo, hemos tratado de sustituir estos parámetros por propiedades más comunes. Entre éstas, las más estrechamente relacionadas con  $Al_0$  fueron el contenido de agua (volumétrico) a saturación ( $\theta_s$ ) y la macro y mesoporosidad ( $\theta_s-\theta_{1/3}$ ). Asimismo, hemos utilizado la razón  $CE/[(Na+Mg)/Ca]$  como parámetro integrador de la tendencia al hinchamiento/ dispersión frente a la floculación. En la Fig. 3 se muestra el diagrama de dispersión de los dos primeros componentes de un análisis de componentes principales, y que incluye además de las citadas variables, la densidad aparente ( $\rho_b$ ) y la microporosidad ( $\theta_{15}$ ). En



**FIGURA 3.** Diagrama de dispersión de los dos primeros componentes del análisis de componentes principales con las variables:  $\rho_b$ ,  $\theta_{15}$ ,  $Al_0$ , relación  $(\theta_s-\theta_{1/3})$  y ratio  $CE/[(Na+Mg)/Ca]$ . Los símbolos representan las categorías de  $K_s$  en laboratorio. Se ha observado la misma tendencia para  $K_s$  en campo.

ACP fueron extraídos los siguientes componentes con autovalores superiores a 1 que explican el 68.2 % de la varianza:

$$C1 = 0.88 (\theta_S - \theta_{1/3}) + \\ + 0.53 CE/[(Na+Mg)/Ca] + 0.21 q_s - \\ - 0.72 \rho_b - 0.71 \theta_{15} \\ C2 = 0.93 \theta_S + 0.40 \theta_{15} + 0.27 (\theta_S - \theta_{1/3}) - \\ - 0.43 CE/[(Na+Mg)/Ca] - 0.1 \rho_b$$

En el componente C1 aparecen asociadas la macro-meso porosidad ( $\theta_S - \theta_{1/3}$ ) con  $CE/[(Na+Mg)/Ca]$ , a las que se oponen con un peso similar (negativo)  $\theta_b$  y  $\theta_{15}$ . En el componente C2 predomina la influencia de la porosidad total,  $\theta_S$ . La figura 3 muestra el diagrama de dispersión de  $K_s$  por categorías frente a los componentes C1 y C2. Las muestras con categoría “muy baja” de  $K_s$  están asociadas a valores negativos del componente C1, es decir, se corresponden con muestras con densidades elevadas y bajos valores de macro-mesoporosidad y  $CE/[(Na+Mg)/Ca]$ . Esta tendencia ha sido atribuida al aumento de la presión de hinchamiento bajo condiciones de baja CE y altos contenidos en (Na+Mg) cambiables en las muestras menos ándicas, con la consiguiente disminución de  $K_s$  (Armas *et al.*, 2003). El componente 2 no parece tener una influencia importante en  $K_s$ , aunque la mayor incidencia de  $K_s$  “muy baja” está asociada a valores elevados de microporosidad textural,  $\theta_{15}$ .

Estos resultados son consistentes con los obtenidos por Armas *et al.* (2003) y justifican la sustitución de  $Al_0$  por  $(\theta_S - \theta_{1/3})$  como indicador de agregación.

En el análisis estadístico no se encontró un efecto significativo de la materia orgánica, probablemente debido a los niveles relativamente homogéneos entre suelos. No obstante, cabe destacar que, aunque no significativamente, los niveles de materia orgánica descienden en profundidad, donde se ha encontrado la mayor incidencia de valo-

res bajos de  $K_s$ . Por otra parte, la complejidad de las interacciones entre estos agentes agregantes (materiales amorfos, óxidos de Fe y Al), la naturaleza variable de la MO aportada con las enmiendas y el agua de riego y los cationes de cambio Na y Mg, explican en parte la elevada variabilidad que presenta la conductividad hidráulica y la dificultad de predecir el comportamiento del suelo en estos sistemas complejos. Asimismo, la interpretación de estas relaciones puede complicarse por la acción de otros factores como la sorción específica de sulfato y fosfato por los materiales ándicos y óxidos que puede influir negativamente en la estabilidad estructural, como ha puesto de manifiesto van Essen (1999) en los suelos 2 y 3 de este estudio.

## CONCLUSIONES

La variación estacional de CE y cationes de cambio en los suelos estudiados ha permitido confirmar la tendencia observada por Armas *et al.* (2003). Para valores de  $Al_0$  inferiores al 3 %, la interacción entre salinidad y cationes de cambio puede conducir a valores muy bajos de conductividad hidráulica,  $K_s$ , lo que sugiere que el efecto agregante de los materiales ándicos no puede contrarrestar el deterioro estructural debido a los minerales de arcilla.

En el periodo estudiado la reducción de  $K_s$  parece relativamente reversible al cambiar las condiciones edáficas. Los resultados ponen de manifiesto la conveniencia de incluir las propiedades ándicas en los análisis de rutina para la caracterización de suelos cultivados en las Islas Canarias y suministran una base para desarrollar funciones de transferencia en los suelos ándicos.

Asimismo, los resultados reflejan el interés del análisis multivariante de parámetros físicos, químicos y mineralógicos para describir la calidad física de estos tipos de suelos.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado dentro del proyecto HID98-0952 (CICYT) y del Convenio entre el Departamento de Edafología y Geología de La Universidad de La Laguna y BALTEN (Balsas de Tenerife). S. Espinel agradece la Beca de Investigación para doctorandos, concedida por CajaCanarias.

## REFERENCIAS

- Abder-Rahman, W. y Rowell, D.L. (1979): The influence of magnesium in saline and sodic soils: a specific effect or a problem of cation exchange? *J. Soil Sci.* 30, 535-46.
- Armas Espinel, S., Hernández Moreno, J.M., Muñoz Carpena, R., Regalado, C.M. (2003): Physical properties of "sorriba" cultivated volcanic soils from Tenerife in relation to andic diagnostic parameters. *Geoderma* 117, 297-311.
- Balks, M.R., Bond, W.J., Smith, C.J. (1998): Effects of sodium accumulation on soil physical properties under an effluent-irrigated plantation. *Aust. J. Soil Res.* 36, 821-830.
- Bartoli, F., Philipppy, R., Burtin, G. (1988): Aggregation in soil with small amounts of swelling clays. I. Aggregate stability. *J. of Soil Sci.* 39, 593-616.
- Blakemore, L.C., Searle, P.L., Daly, B.K. (1981): Methods for chemical analysis of soils. New Zealand Soil Bureau Scientific Report 10A.
- Cook, F.J., Kelliher, F.M., McMahon, S.D. (1994): Changes in infiltration and drainage during wastewater irrigation of a highly permeable soil. *J. Environ. Qual.* 23, 476-482.
- Dorel M., Roger-Estrade, J., Manichon, H., Delvaux, B. (2000): Porosity and soil water properties of Caribbean volcanic ash soils. *Soil Use and Management* 16, 133-140.
- El-Swaify, S. A., Swindale, L. D., Uehara, G. (1969): Salinity Tolerances of Certain Tropical Soils and Relationships Between Sodium Ion Activities and Soil Physical Properties. Research and Development Progress Report No 419. Unid States Department of the Interior, 1-46.
- El-Swaify, S. A. (1973): Structural changes in tropical soils due to anions in irrigation water. *Soil Sci.* 115, 1, 64-72.
- El-Swaify, S.A. (1975): Changes in the physical properties of soil clays due to precipitated aluminium and iron hydroxides: I. Swelling and aggregate stability after drying. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 39, 1056-1063.
- Emerson, W. W. (1977): Physical properties and soil structure. In: J. S. Russel and E. L. Greacen (Eds.), Soil factors in crops production in a semiarid environment. University of Queensland Press, St. Lucia, Qld., pp. 78-104.
- FAO (1998): World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Reports 84, FAO, Roma.
- Halliwell, D.J., Barlow, K.M., Nash, D.M. (2001): A review of the effect of wastewater sodium on soil physical properties and their implication for irrigation system. *Aust. J. Soil Res.* 39, 1259-67.
- Keren, R., Singer, M.J. (1989): Effect of low electrolyte concentration on hydraulic conductivity of clay-sand-hydroxy polymers systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53, 349-355.
- Klute, A. (1986): Water retention: Laboratory methods. In: Methods of soil analysis. Part 1, 2nd edn., Agronomy 9, ASA, SSSA, Madison, 635-657 pp.
- Magesan, G.N., Williamson, J.C., Sparling, G.P., Shipper, L.A., Lloyd-Jones, R.H. (1999): Hydraulic conductivity in soils



- irrigated with wastewaters of differing strengths: Field and laboratory studies. *Aust. J. Soil Res.* 37, 391-402.
- McNeal, B.L., Layfield, D.A., Norvell, W.A., Rhoades, J.D. (1968). Factors influencing hydraulic conductivity of soils in the presence of mixed-salt solutions. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32, 187-190.
- Reynolds, W.D., Elrick, D.E., Clothier, B.E. (1985): The constant head well permeameter: Effect of unsaturated flow. *Soil Sci.* 139, 172-192.
- Rengasamy, P., Greene, R.S.B., Ford, G.W. (1986): Influence of magnesium on a aggregate stability in a sodic red-brown earths. *Aust. J. Soil Res.* 24, 229-238.
- Shainberg, I., Singer, M.J., Janitzky, P. (1987): Effect of aluminium and iron oxides on hydraulic conductivity of sandy loam soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51, 1283-1287.
- Sparling, G.P., Shipper, L.A., Russell, J.M. (2001): Changes in soil properties after application of dairy factory effluent to New Zealand volcanic ash and pumice soils. *Aust. J. Soil Res.* 39, 505-18.
- SPSS (1999): Version 10.0.6 for Windows, SPSS, Inc, Chicago.
- Soil Survey Staff (1999): Soil Taxonomy. Second Edition. NRCS-USDA Agric. Handb. 436, US Gov. Print. Office; Washington, DC.
- Van Essen, E. (1999): Effects of salinization on aggregate stability in andic soils. A case study on irrigated artificial soils in arid climate on the Canary Islands. MsC Thesis, Soil formation and Ecopedology, J050-711, Agricultural University of Wageningen.