

# CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA, FÍSICA, QUÍMICA, MINERALÓGICA Y GÉNESIS DE UN PEDÓN SÓDICO ALCALINO UBICADO EN PAPELÓN, ESTADO PORTUGUESA<sup>1</sup>

## MORPHOLOGICAL, PHYSICAL, CHEMICAL AND MINERALOGICAL CHARACTERIZATION AND GENESIS OF AN ALKALINE SODIC PEDON FROM PAPELÓN, PORTUGUESA STATE<sup>1</sup>

José P. Guerrero-Alves\*, Idefonso Pla-Sentís\*\* y Ángel Valera\*

<sup>1</sup>Trabajo financiado por el FONACIT (Proyecto PEM 2001001622).

\* Profesores. Universidad "Rómulo Gallegos". Centro de Investigación y Extensión en Suelos y Aguas (CIESA). San Juan de los Morros 2301, Guárico-Venezuela. \*\* Profesor. Universidad Central de Venezuela. Instituto de Edafología. Maracay 2101, estado Aragua. Venezuela.

### RESUMEN

De los 831 millones de hectáreas que la FAO/UNESCO señala mundialmente para suelos afectados por sales, más del 50% (434 millones de hectáreas) son suelos sódico-alcálicos. Con el propósito de identificar factores y procesos que intervienen en la génesis de suelos sódicos, un pedón sódico-alcálico en la planicie aluvial del río Portuguesa se caracterizó morfológica, física, química y mineralógicamente. Los resultados señalan: porcentajes de sodio intercambiable (PSI) hasta 43%, acumulación de  $\text{NaHCO}_3$ , pHs elevados ( $> 8,5$ ), densidades aparentes ( $D_a$ ) muy altas (hasta  $2,03 \text{ Mg m}^{-3}$ ), conductividades hidráulicas ( $< 0,5 \text{ mm h}^{-1}$ ) y macroporosidades muy bajas ( $< 3,4\%$ ) en el Btn y Cn, precipitación de  $\text{CaCO}_3$ , mineralogía mixta destacada por clorita, interestratificado 10/14m, cuarzo y micas. Se infiere que el suelo se origina, primero, con materiales trabajados por acción del hielo glaciar en los Andes venezolanos durante el período árido Pleistocénico. Posteriormente, durante el Holoceno más húmedo y cálido, fueron acarreados y depositados en la planicie del río Portuguesa donde interaccionaron con aguas con  $\text{NaHCO}_3$  en las microdepressiones. Estas sales de sodio en solución se formaron por intemperización de silicatos sódicos del núcleo cristalino de la cordillera andina o por acumulación de materia orgánica, en ambiente reductor, que eliminó sulfatos como  $\text{H}_2\text{S}$ . La evolución del suelo permitió migración de arcilla, sustitución progresiva en el complejo de cambio de iones divalentes por sodio, precipitación de  $\text{CaCO}_3$ , formación del horizonte nátrico, eliminación de sales en drenaje y, finalmente, cuando las sales totales disminuyeron hasta niveles críticos, ocurrió degradación de estructura.

**Palabras Clave:** Génesis de suelos; hidrólisis alcalina; carbonato de sodio; carbonato de calcio.

### SUMMARY

Salt-affected soils are a major factor limiting plant growth and productivity of crop plants. Out of the 831 million hectares that the FAO/UNESCO reports worldwide as salt affected soils more than 50 % (434 million hectares) are alkaline-sodic soils. This study was conducted in order to identify factors and processes in the genesis of an alkaline-sodic soil from the alluvial plains of Portuguesa River. Morphological, physical, chemical and mineralogical attributes were determined. Results indicated exchangeable sodium percentage (ESP) up to 43 %,  $\text{NaHCO}_3$  accumulation, high pHs ( $> 8.5$ ), very high bulk densities (up to  $2.03 \text{ Mg m}^{-3}$ ), both low hydraulic conductivity ( $< 0.5 \text{ mm h}^{-1}$ ) and macroporosity values ( $< 3.4\%$ ) in Btn and Cn horizons,  $\text{CaCO}_3$  precipitation, mixed mineralogy characterized by chlorite, interstratified 10/14m, quartz and micas. It was inferred that the soil was produced, first, from materials grounded by glacial ice action in Venezuelan Andes during the arid phase of Pleistocene. Later, during the Holocene humid and warmer climate, sediments were transported and deposited in plains of Portuguesa River and then interacted with  $\text{NaHCO}_3$  rich waters in micro-depressions. Alkaline sodium salts could be formed by weathering of sodic silicates in rocks from Venezuelan Andes or from accumulation of organic matter in a reduction environment with elimination of sulfates as  $\text{H}_2\text{S}$ . The soil evolved to promote clay migration, substitution of Ca-Mg by sodium in soil exchange complex,  $\text{CaCO}_3$  precipitation, natric horizon formation, elimination of salts in deep drainage, and finally, when total salt quantities diminished to critic levels the degradation of soil structure was produced.

**Key Words:** Soil genesis; alkaline hydrolysis; sodium carbonate; calcium carbonate.

RECIBIDO: junio 12, 2007

ACEPTADO: mayo 14, 2008

## INTRODUCCIÓN

Los suelos afectados por sales (salinos y alcalinos) corresponden a una de las principales causas que limitan el crecimiento de las plantas y la productividad de los cultivos a escala mundial. De los 831 millones de hectáreas que la FAO/UNESCO señala para suelos afectados por sales, más del 50% (434 millones de hectáreas) corresponde a suelos sódicos alcalinos (Jin *et al.*, 2006). Las principales limitaciones que experimentan estos suelos son la drástica restricción en el movimiento del agua, la gran compactación natural subyacente que les confiere una gran dureza y que impide un adecuado desarrollo radicular y los elevados valores de pH producto de los contenidos relativamente elevados de bicarbonato de sodio. Esto último prácticamente excluye la presencia de iones divalentes (Ca y Mg) y oligoelementos en la solución del suelo y trae como consecuencia desordenes nutricionales en las plantas.

En Venezuela, suelos sódicos y salino-sódicos han sido estudiados en la cuenca del Lago de Maracaibo, llanos Centro-Occidentales (estados Apure, Cojedes, Guárico y Portuguesa), algunas áreas dispersas en los estados Falcón, Lara y Yaracuy, la cuenca del Lago de Valencia y en parte del estado Monagas (Comerma y Arias, 1974; Schargel, 1984 y 1988; Pla Sentis, 1985; García-Miragaya *et al.*, 1990; Guerrero, 1998; Guerrero-Alves *et al.*, 2004 y 2007).

Los suelos sódicos se caracterizan por presentar porcentajes de sodio intercambiable (PSI) > 15 o relaciones de adsorción de sodio (RAS) > 13 (mmol l<sup>-1</sup>)<sup>1/2</sup>, conductividades eléctricas en el extracto de saturación (CE) < 4,0 dS m<sup>-1</sup> (Salinity Laboratory Staff, 1954; Soil Survey Staff, 1999) y pH en pasta saturada que puede ser > 8,5 (Salinity Laboratory Staff, 1954); aunque el pH no es un criterio diagnóstico de sodicidad (Van Beek y Van Breemen, 1973) porque existen suelos sódicos con pH menor que 8,5. No obstante, suelos con valores elevados de pH (>8,5) tienen generalmente grandes cantidades de sodio asociadas a la acumulación de sales de sodio (bicarbonatos y carbonatos) con hidrólisis alcalina (Cruz-Romero y Coleman, 1975; Gupta y Abrol, 1990; Guerrero-Alves *et al.*, 2002, 2004, 2007) y relativamente elevado contenido de carbonatos precipitados (insolubles) de iones divalentes (Ca y Mg; Gupta y Abrol, 1990).

Por su parte, Guerrero (1998) señaló que un recuento de los procesos que determinan la magnitud de la

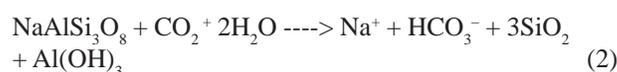
alcalinidad residual (ALCR) puede ser útil para identificar los factores asociados con la formación de suelos alcalinos (pH > 8,5). La ALCR, también denominada Carbonato de Sodio Residual (CSR) según Guerrero-Alves *et al.*, 2007, puede escribirse como:

$$ALCR = [Na^+] + [K^+ - [Cl^-] - 2[SO_4^{2-}] - [NO_3^-]] \quad (1)$$

y corresponde a la porción de la alcalinidad total asociada a bicarbonatos y carbonatos de iones monovalentes (Van Beek y Van Breemen, 1973) y los corchetes [ ] se refieren a concentraciones molares de las especies en solución.

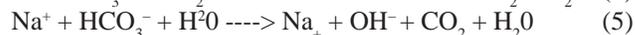
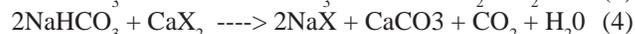
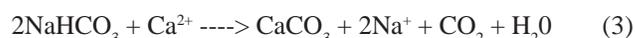
La ecuación (1) sugiere que los incrementos en ALCR son producto de incrementos en [Na<sup>+</sup>] y/o [K<sup>+</sup>] o en disminuciones en las concentraciones de aniones diferentes a bicarbonatos y carbonatos (Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> o NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y como el K<sup>+</sup> se encuentra habitualmente en muy bajas cantidades en la solución del suelo, el aumento de la ALCR podría ser sólo atribuible a la acumulación de sales alcalinas de sodio. Consecuentemente, si en el medio existen incrementos de Na<sup>+</sup> y los contraiones son cloruros o sulfatos no hay ganancia neta de ALCR (Guerrero-Alves *et al.*, 2004, 2007) por lo que suelos que acumulan Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y NaCl no deberían considerarse sódicos, aún teniendo valores de RAS elevados (Pla, 1985; Gupta y Abrol, 1990), porque pueden ser desodificados sin enmiendas.

La intemperización de la albita (NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>), una plagioclasa sódica presente en rocas y sedimentos en alrededor de 0,60% (Lerman *et al.*, 2007), puede ser escrita como:



y da cuenta, entre otras, de la producción de bicarbonato de sodio en la naturaleza.

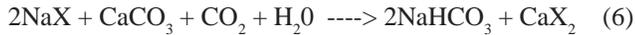
Cuando se acumula en el suelo, el bicarbonato de sodio puede experimentar la serie de reacciones siguiente:



La 3 y la 4 (Guerrero-Alves *et al.*, 2004) prevén la precipitación de carbonatos de Ca-Mg y la 5 (hidrólisis del ión bicarbonato) del origen de valores de pH elevados en suelos sódicos alcalinos (Guerrero-Alves *et al.*, 2004). Por otra parte, la reacción 3 permite explicar la

acumulación conjunta de sales neutras de sodio, como cloruros y sulfatos, y la 4 equivale a la sodificación del complejo de intercambio.

Por otra parte, el incremento de pHs con la dilución (mayor relación suelo-agua) en suelos sódicos alcalinos puede ser interpretado, basados en el inverso de la reacción 4:



donde la producción de bicarbonato y su hidrólisis posterior justifica tal incremento.

El propósito de este trabajo fue el de caracterizar morfológica, física, química y mineralógicamente un suelo sódico alcalino de Papelón (estado Portuguesa) e inferir su posible génesis en el ambiente fisiográfico de los llanos occidentales de Venezuela.

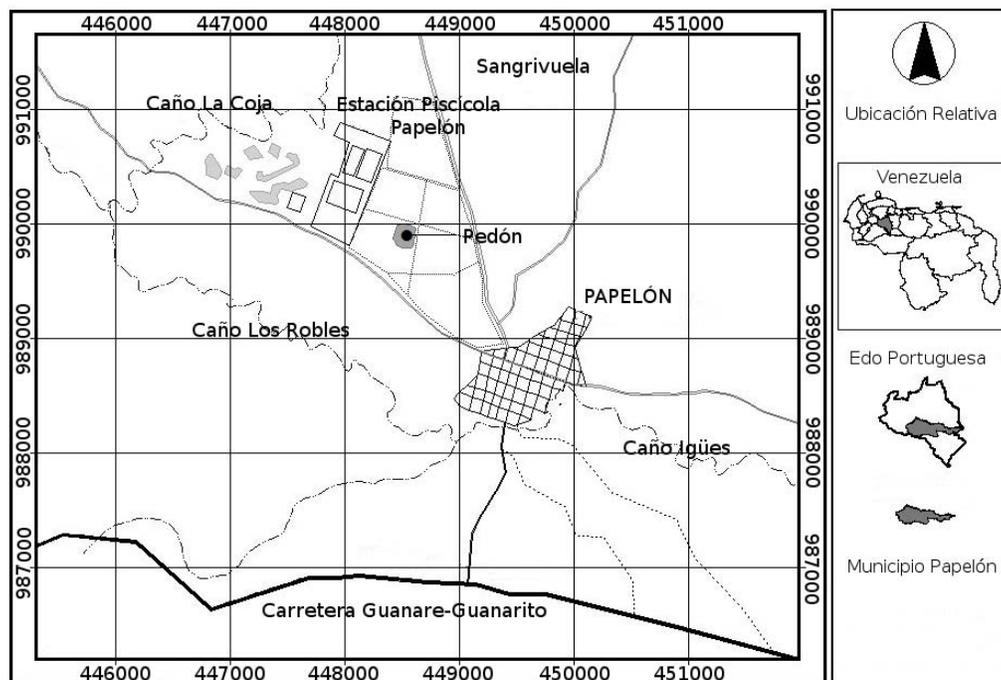
Se da particular atención a los factores y procesos que en este suelo podrían estar involucrados en el desarrollo de acidez superficial, la formación del horizonte nátrico, la precipitación de carbonatos de Ca-Mg y el uso de la alcalinidad residual como un indicador cualitativo y cuantitativo de la acumulación de sales alcalinas de

sodio y la eventual sodificación del complejo de cambio. Por otra parte, también se discuten aspectos relacionados con la dinámica climática del Cuaternario en los Andes venezolanos para inferir si la concentración de sales alcalinas de sodio en el suelo fue producto de la intemperización de silicatos por el CO<sub>2</sub>, de la reducción de sulfatos por acción de la materia orgánica del suelo o de ambas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Características del área de estudio.** El área de estudio se encuentra en la planicie aluvial del río Portuguesa que, al igual que el río Guanare, nace en la cordillera de los Andes y confluye con éste, aguas abajo, antes de desembocar en el río Apure, un tributario del Orinoco.

El pedón sódico alcalino allí seleccionado (UTM: 448 536 E; 989 886 N; Figura 1) correspondió a un Natraqualfs y se ubicó en la Estación Pecuaria Papelón (nombre que se usará en lo sucesivo para referirlo), perteneciente a la Empresa Rental de la Universidad Experimental de los Llanos Occidentales "Ezequiel Zamora" (REUNELLEZ).



**FIGURA 1.** Ubicación aproximada del pedón Papelón (UTM: 448 536 E; 989.886 N) en el área de estudio.

Los Natraqualfs representan un área relativa de un 20% dentro de una asociación con Tropaqualfs y Haplustalfs (Schargel *et al.*, 1988). Desde el año 1982, los suelos de la Estación fueron deforestados y colocados bajo producción; arroz durante el período de lluvias seguido por sorgo sembrado a finales del mismo período. No obstante, a pesar de obtenerse buenos rendimientos en términos generales para el arroz, en los Natraqualfs el sorgo no logró completar su ciclo secándose las plantas antes de formar la panoja (Schargel *et al.*, 1988).

**Descripción del suelo en el campo, muestreo y análisis físicos de campo y laboratorio.** La descripción del perfil fue realizada según procedimientos del Soil Survey Division Staff (1993). Por otra parte, cilindros representativos de suelo (no disturbados) fueron tomadas en superficie con un toma muestra tipo Uhland (Pla Sentís, 1983) y en el tope de los restantes horizontes genéticos (calicata escalonada) mediante un procedimiento que permitió esculpir e introducir manualmente un cilindro de suelo en los contenedores metálicos (Guerrero-Alvis, 1998). Las determinaciones en las muestras no disturbadas incluyeron conductividad hidráulica en régimen saturado, distribución de macro y microporosidad y densidad aparente ( $D_a$ ) según Pla Sentís (1983). Sobre el tope de cada horizonte genético también se realizaron determinaciones de  $D_a$  por el método del hoyo (Pla Sentís, 1983).

Además, muestras disturbadas de suelo fueron tomadas desde la superficie, cada 10 cm, hasta los 250 cm. Los detalles del muestreo y del procesamiento de las muestras disturbadas para análisis físico se encuentran en Guerrero-Alves *et al.* (2004). En las muestras disturbadas destinadas para análisis físico se determinó distribución de tamaño de partículas (método de Bouyoucos) y fraccionamiento de arena (Pla Sentís, 1983).

**Análisis químicos de laboratorio.** Los detalles del procesamiento de las muestras con fines químicos se encuentran en Guerrero-Alves *et al.* (2004). Estas muestras fueron utilizadas para medir pH en pasta saturada y obtener el extracto de saturación (ES) para la determinación de  $Ca+Mg$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$  (iones solubles), relación de adsorción de sodio (RAS) y conductividad eléctrica (CE) como lo explica U.S. Salinity Laboratory Staff (1954). Como todos los extractos de Papelón fueron coloreados, se usó el procedimiento de Robbins (1989) para clarificarlos. Las sales solubles [ $Ca(HCO_3)_2$ ,  $Mg(HCO_3)_2$ ,  $NaCl$ ,  $Na_2SO_4$ ,  $NaHCO_3$  y  $KCl$ ] fueron ajustadas de acuerdo a la composición de iones solubles siguiendo un procedimiento

sugerido por Guerrero-Alves (1998) para garantizar electroneutralidad en los ES. Además, también se determinó la capacidad de intercambio catiónico (CIC), el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) según lo planteado por U.S. Salinity Laboratory Staff (1954) y carbonatos precipitados de calcio y magnesio (Pla Sentís, 1969). Todas las determinaciones químicas representan el promedio de tres determinaciones.

Mineralogía de las arcillas y de las arenas densas. Los tratamientos de saturación y calentamiento de las muestras de arcilla orientada se realizaron según Jackson (1969) y los espectros de difracción de rayos X fueron registrados con las condiciones delineadas en Guerrero-Alves *et al.* (2004). Los minerales identificados se cuantificaron como porcentaje (relativos al área total) basados en los picos de mayor intensidad (Malagón, 1979).

Las fracciones de las arenas densas se analizaron con un microscopio petrográfico (Malagón, 1979). La preparación de las muestras incluyó los procedimientos de Parfenoff *et al.* (1970) y Aleixandre y Pinilla (1968) y se describen con detalle en Guerrero-Alves *et al.* (2004). La cantidad de cada mineral identificado fue expresada en porcentaje, basado al total de todos los granos minerales identificados. Por otra parte, la proporción de intemperismo (Malagón, 1979) fue determinada como la relación de minerales resistentes (circón + turmalina) / minerales alterables (anfíboles + piroxenos) y fue usada como criterio para verificar posible uniformidad de materiales parentales.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Características morfológicas y físicas.** El pedón sódico alcalino Papelón fue clasificado como un Vertic Natraqualfs, limoso fino, mixto, activo, isohipertérmico (Soil Survey Staff, 2006) y exhibió una secuencia de horizontes **Ap-En-Btn-Cn** con un espesor del solum de 104 cm (Cuadro 1). Los matices en húmedo de los horizontes vienen principalmente representados por 10YR (diferentes tonos marrones); aunque en el Btn2 también se encontraron matices 2.5YR (colores oliváceos distintivos de condiciones de mal drenaje).

Las texturas entre el **Ap** y el **Btn** fueron siempre francas o franco limosas presentando el horizonte **Cn**, en algunos casos, más del doble de arcilla que el de los horizontes precedentes y que lo clasificó como franco arcillo limoso (Cuadros 1 y 2).

**CUADRO 1.** Características morfológicas en el suelo Papelón (CM = color Munsell).

| Horizonte               | Profundidad (cm) | CM Matriz (húmedo)                               | CM Moteados (húmedo)                                      | a %  | A %  | Textura ‡ | Estructura # | Consistencia           | Límite entre horizontes |
|-------------------------|------------------|--|---|------|------|-----------|--------------|------------------------|-------------------------|
| Ap                      | 0-10             | 10YR4/4, 10YR5/3<br>10YR3/2                      | –   | 36,3 | 7,8  | FL        | 1, f, bcs    | ld, fr, la, lp         | plano y abrupto         |
| En <sup>y</sup>         | 10-20            | 10YR6/3, 10YR5/3                                 | 10YR5/2, 10YR5/6  | 37,4 | 15,1 | F         | 0, ma        | d, fr, la, lp          | plano y abrupto         |
| Btm1 <sup>§, h, †</sup> | 20-56            | 10YR6/2, 10YR5/1                                 | 10YR5/4, 10YR5/6<br>7,5YR5/6                              | 32,6 | 18,2 | F-FL      | 2-3, p, g-mg | d, fi-mfi,<br>moa, mop | claro e irregular       |
| Btm2 <sup>h, †</sup>    | 56-104           | 2,5YR4/4, 2,5Y4/3<br>10YR4/5, 10YR4/6<br>10YR5/6 | 10YR5/2, 2,5Y5/2<br>2,5Y4/2, 10YR4/2<br>10YR4/1, 7,5YR5/6 | 29,1 | 18,9 | FL        | 1, p, m      | d, fi-mfi,<br>moa, mop | irregular y difuso      |
| 2Cn <sup>§</sup>        | 104-200          | –  | –   | 8,3  | 32,6 | FAL       | 1, p, m      | d, fi-mfi,<br>mua, mup | –                       |

‡ FL : franco limoso; F: franco; FAL : franco arcillo limoso

# 0 : sin estructura; 1 : débil; 2 : moderado; 3 : fuerte; f : fino; m : medio; g : grueso; mg : muy grueso; ma : masivo; p : prismática; bcs : blocosa subangular

ld : ligeramente duro; d: duro; fr : friable; fi: firme; mfi: muy firme; la: ligeramente adherente; moa: moderadamente adherente; mua: muy adherente; lp: ligeramente plástico; mop: moderadamente plástico; mup: muy plástico

‡ Presenta abundantes nódulos de Fe-Mn en la base del horizonte; † nódulos de Fe-Mn dispersos en la masa del horizonte; § pseudomicelios y masas pulverulentas blandas de carbonatos

† De pocas a frecuentes películas de arcilla

**CUADRO 2.** Atributos químicos\* y físicos en el suelo Papelón determinados cada 10-cm de profundidad.

| Profundidad<br>(cm) | pH   | CE<br>dS m <sup>-1</sup> | PSI<br>% | RAS<br>(m mol l <sup>-1</sup> ) <sup>1/2</sup> | (CaMg)p | CIC   | Na <sub>int</sub><br>kg <sup>-1</sup> | Na <sub>imp</sub> | arena | arcilla | -----c mol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup> ----- |                   | af+amf<br>(libre A) | esqueleto<br>grueso |
|---------------------|------|--------------------------|----------|--|---------|-------|---------------------------------------|-------------------|-------|---------|--|-------------------|---------------------|---------------------|
|                     |      |                          |          |  |         |       |                                       |                   |       |         | Na <sub>int</sub>                                | Na <sub>imp</sub> |                     |                     |
| 0-10                | 5,18 | 0,702                    | 2,88     | 1,95   | 0,24    | 8,32  | 0,24                                  | 1,06              | 36,3  | 7,8     | 41,19  | 37,98             | 0,26                |                     |
| 10-20               | 6,17 | 0,615                    | 18,76    | 10,46  | 0,09    | 9,54  | 1,79                                  | 1,99              | 37,4  | 15,1    | 36,29  | 30,81             | 0,62                |                     |
| 20-30               | 7,26 | 1,113                    | 33,69    | 18,63  | 0,22    | 12,91 | 4,35                                  | 3,81              | 34,9  | 19,0    | 33,12  | 26,83             | 0,21                |                     |
| 30-40               | 8,34 | 1,563                    | 38,24    | 21,52  | 1,17    | 13,99 | 5,35                                  | 5,86              | 31,8  | 19,0    | 33,62  | 27,23             | 0,01                |                     |
| 40-50               | 8,89 | 1,631                    | 39,39    | 24,71  | 9,00    | 13,66 | 5,38                                  | 6,04              | 31,6  | 17,3    | 31,86  | 26,35             | 0,20                |                     |
| 50-60               | 8,95 | 1,270                    | 42,93    | 20,74  | 3,36    | 12,37 | 5,31                                  | 4,99              | 31,6  | 17,3    | 33,66  | 27,84             | 0,02                |                     |
| 60-70               | 8,69 | 1,312                    | 42,81    | 22,15  | 2,30    | 12,24 | 5,24                                  | 4,80              | 31,3  | 19,0    | 36,61  | 29,65             | 0,03                |                     |
| 70-80               | 8,79 | 0,957                    | 42,28    | 16,50  | 3,07    | 12,56 | 5,31                                  | 4,53              | 34,6  | 19,0    | 36,31  | 29,41             | 0,11                |                     |
| 80-90               | 8,73 | 1,064                    | 37,27    | 18,26  | 2,29    | 12,37 | 4,61                                  | 4,89              | 30,2  | 17,9    | 31,29  | 25,69             | 0,09                |                     |
| 90-100              | 8,64 | 1,075                    | 32,75    | 17,93  | 1,77    | 12,55 | 4,11                                  | 4,02              | 22,9  | 20,1    | 23,93  | 19,12             | 0,05                |                     |
| 100-110             | 8,42 | 0,970                    | 35,25    | 16,58  | 1,68    | 12,03 | 4,24                                  | 4,28              | 20,1  | 19,3    | 20,67  | 16,68             | 0,06                |                     |
| 110-120             | 8,44 | 0,769                    | 32,41    | 13,61  | 1,11    | 12,59 | 4,08                                  | 3,91              | 14,0  | 19,6    | 15,74  | 12,65             | 0,02                |                     |
| 120-130             | 8,38 | 0,821                    | 30,58    | 14,14  | 0,93    | 13,44 | 4,11                                  | 4,18              | 11,7  | 21,8    | 11,48  | 8,98              | 0,03                |                     |
| 130-140             | 8,30 | 0,612                    | 28,23    | 10,66  | 0,86    | 14,77 | 4,17                                  | 3,79              | 9,5   | 22,3    | 8,52   | 6,62              | 0,03                |                     |
| 140-150             | 8,14 | 0,339                    | 26,29    | 7,63   | 0,30    | 14,95 | 3,93                                  | 3,69              | 9,5   | 22,3    | 8,71   | 6,77              | 0,00                |                     |
| 150-160             | 8,15 | 0,379                    | 24,64    | 6,94   | 0,65    | 15,18 | 3,74                                  | 3,87              | 6,1   | 22,9    | 5,19   | 4,00              | 0,01                |                     |
| 160-170             | 8,12 | 0,272                    | 23,60    | 5,98   | 0,06    | 18,18 | 4,29                                  | 3,61              | 6,1   | 33,5    | 4,66   | 3,10              | 0,00                |                     |
| 170-180             | 8,31 | 0,410                    | 20,69    | 8,42   | 0,30    | 24,02 | 4,97                                  | 4,53              | 4,5   | 56,7    | 4,55   | 1,97              | 0,00                |                     |
| 180-190             | 8,45 | 0,532                    | 19,79    | 9,19   | 5,63    | 24,61 | 4,87                                  | 4,71              | 3,9   | 55,6    | 3,92   | 1,74              | 0,01                |                     |
| 190-200             | 8,17 | 0,544                    | 18,34    | 11,88  | 1,72    | 23,17 | 4,25                                  | 4,73              | 2,2   | 46,6    | 2,77   | 1,48              | 0,00                |                     |
| 200-210             | 8,05 | 0,432                    | 17,70    | 8,61   | 0,53    | 25,82 | 4,57                                  | 4,46              | 6,1   | 46,1    | 4,38   | 2,36              | 0,00                |                     |
| 210-220             | 7,81 | 0,276                    | 16,89    | 6,92   | 0,07    | 24,63 | 4,16                                  | 4,35              | 6,4   | 40,8    | 4,73   | 2,80              | 0,00                |                     |
| 220-230             | 7,85 | 0,357                    | 15,47    | 4,89   | 0,09    | 22,89 | 3,54                                  | 2,99              | 5,6   | 37,4    | 3,89   | 2,44              | 0,05                |                     |
| 230-240             | 8,03 | 0,424                    | 15,73    | 9,66   | 0,32    | 21,87 | 3,44                                  | 4,21              | 4,5   | 39,7    | 3,11   | 1,88              | 0,07                |                     |
| 240-250             | 7,98 | 0,486                    | 14,89    | 8,53   | 0,19    | 22,36 | 3,33                                  | 4,07              | 4,2   | 43,3    | 2,39   | 1,36              | 0,00                |                     |

pH = pH para pasta saturada, CE = conductividad eléctrica para el extracto de saturación, PSI = porcentaje de sodio intercambiable, RAS = relación de adsorción de sodio, (CaMg)p = carbonatos precipitados de Ca y Mg, CIC = capacidad de intercambio catiónico, Na<sub>int</sub> = sodio intercambiable, Na<sub>imp</sub> = sodio intercambiable estimado por la ecuación 7, af+amf = arena fina + arena muy fina, A = arcilla.  
\*Promedio de tres determinaciones para pH, CE, PSI, RAS, (CaMg)p, CIC y Na<sub>int</sub>.

El horizonte **Ap** mostró una consistencia ligeramente dura en seco y en húmedo fue friable, ligeramente adherente y ligeramente plástico; infiriendo esto último un bajo contenido de arcilla. Por debajo del **Ap** se encontró un horizonte **En** de 10 cm, sin estructura (masivo), duro en seco, friable, ligeramente adherente y ligeramente plástico en húmedo. Subyacente al **En** se localizó un horizonte de acumulación de arcilla, **Bt**, el cual fue subdividido, a su vez, en dos subhorizontes: **Btn1** y **Btn2**.

El **Btn1** se caracterizó por poseer una estructura prismática entre moderada y fuerte y de gruesa a muy gruesa, mientras que el **Btn2** presentó una estructura prismática débil y media. Ambos fueron duros en seco y en condición húmeda se presentaron como firmes a muy firmes, moderadamente adherentes y moderadamente plásticos lo que refleja un mayor contenido de arcilla que los horizontes suprayacentes y califican al **Bt**, conjuntamente con los elevados contenidos de sodio, como un horizonte nátrico (**Btn**).

La función de profundidad de componentes estables, arena fina más arena muy fina (af+amf) sobre base libre de arcilla (Cuadro 2), es consistente con una uniformidad de materiales parentales hasta los 90 cm por lo que la acumulación de arcilla hasta esa profundidad tendría un origen iluvial. De la misma manera, la variación en la proporción de intemperismo (Cuadro 3) también es concordante con esa suposición. Por otra parte, la iluviación de arcilla fue corroborada por la descripción de pocas a frecuentes películas de arcilla en el horizonte **Btn** (Cuadro 1).

Con relación al horizonte **Cn**, éste exhibió una estructura prismática débil, media, con una consistencia dura en seco y de firme a muy firme, muy adherente y muy plástica en húmedo lo cual es un reflejo del contenido de arcilla mucho mayor que el de los horizontes precedentes; especialmente hacia el fondo del perfil (Cuadro 2). Como esto no es consistente con la iluviación de arcilla, pues en el **C** debería bajar su contenido, es posible que este comportamiento en la variación del contenido de arcilla (Cuadro 2) sea consecuencia de una discontinuidad litológica. Esto se desprende del análisis de las funciones de componentes estables con la profundidad (arena fina + arena muy fina sobre base libre de arcilla, Cuadro 2) y de la proporción de intemperismo (Cuadro 3).

Por otra parte, valores muy elevados de Da (1,85-2,03 Mg m<sup>-3</sup>) estuvieron presentes en los horizontes **Btn** y

**Cn** del suelo Papelón (Cuadro 4). Estas Da estuvieron asociadas a muy bajas macroporosidades ( $\leq 3,4\%$ ) y conductividades hidráulicas ( $\leq 0,5 \text{ mm h}^{-1}$ ; Cuadro 4) lo que confiere al suelo Papelón una muy baja permeabilidad al agua en esas zonas del perfil. Por esta razón, se infiere que el proceso de iluviación de arcilla debió ocurrir en condiciones de mejor permeabilidad donde es posible excluir una condición mucho más salina que la actual; tal como se discute más adelante. Por otra parte, estas características también fueron tomadas como base para clasificar este Natraqualfs en el Subgrupo Vertic (Soil Survey Staff, 2006).

**CUADRO 3.** Mineralogía de arenas densas y proporción de intemperismo (C+T)/(A+P) ♦, para horizontes genéticos seleccionados del suelo Papelón, obtenidos por microscopía de luz polarizada.

| Mineral     | Horizontes    |      |      |      |
|-------------|---------------|------|------|------|
|             | Ap            | En   | Btn1 | 2Cn  |
|             | ----- % ----- |      |      |      |
| augita      | 0,2           | –    | –    | –    |
| biotita     | –             | 0,2  | 2,2  | –    |
| cianita     | –             | –    | 2,2  | –    |
| circón      | 10,6          | 17,4 | 4,6  | –    |
| epidota     | 2,4           | 0,8  | 1,4  | 0,3  |
| granate     | –             | –    | 0,5  | –    |
| hornblenda  | 1,2           | 0,4  | 0,2  | 6,0  |
| moscovita   | 13,4          | 12,2 | 11,4 | 87,5 |
| opacos      | 62,6          | 64,7 | 74,2 | 6,2  |
| rutilo      | 0,8           | 0,2  | 0,2  | –    |
| tremolita   | 0,4           | –    | –    | –    |
| turmalina   | 6,1           | 4,0  | 3,2  | –    |
| zoisita     | 2,4           | –    | 2,0  | –    |
| (C+T)/(A+P) | 9,3           | 53,5 | 39,0 | 0,0  |

♦ (C+T) = Circón + Turmalina; (A+P) = Anfiboles + Piroxenos.

**Propiedades químicas.** Los valores de PSI (> 15%) y CE (< 4 dS m<sup>-1</sup>; Cuadro 3) están mostrando que el suelo Papelón satisface los requerimientos (Salinity Laboratory Staff 1954; Soil Survey Staff, 1999) para un suelo sódico, no salino, a todas las profundidades por debajo de los 10 cm. Sin embargo, valores de RAS > 13, también indicativos de suelos sódicos, sólo se presentan entre los 20-110 cm de profundidad. Por otra parte,

valores de pH en pasta saturada superiores a 8,5, que pronostican concentraciones elevadas de sales de sodio con hidrólisis alcalina, sólo se encuentran entre los 40-100 cm de profundidad. Sin embargo, la distribución de sales en el suelo Papelón (Cuadro 5) confirma, excepto para 0-10 cm, la acumulación de  $\text{NaHCO}_3$  en todo el perfil, indicando que ésta es la más abundante y donde las sales de sodio restantes,  $\text{NaCl}$  y  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , se encuentran en mucho menor proporción y siempre por debajo de  $1 \text{ mmol}_{(+)} \text{ l}^{-1}$  (excepto para  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  entre 0-10 cm). Por otra parte, el  $\text{Ca}+\text{Mg}$  alcanzó concentraciones  $\geq 1,0 \text{ mmol}_{(+)} \text{ l}^{-1}$  sólo en los primeros 10 cm del perfil del suelo ( $3,24 \text{ mmol}_{(+)} \text{ l}^{-1}$ ), estando prácticamente ausentes los iones divalentes por debajo de esa profundidad.

Porta *et al.* (1999) señalan que los efectos desfavorables del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ya se dejan sentir a partir de concentraciones del orden de 0,05 a 0,1% de esta sal. Ello equivaldría a 0,1 a 0,2% de  $\text{NaHCO}_3$  porque en esencia ambas sales son lo mismo, es decir, producen la misma especiación en solución acuosa (en equilibrio con el  $\text{CO}_2$  atmosférico); sólo que el bicarbonato debería estar en una concentración que es el doble de la del carbonato por lo que dicta la estequiometría de estas sales (Nakayama, 1970). Sin embargo, 0,05% de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , asumiendo una  $D_a$  del suelo de  $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$ , correspondería aproximadamente a unos  $20 \text{ mmol}_{(+)} \text{ l}^{-1}$ ; concentración que está ligeramente por encima [unos  $5 \text{ mmol}_{(+)} \text{ l}^{-1}$ ] de la cantidad máxima que fue presentado en Papelón (Cuadro 5). Ello no constituye ninguna cantidad despreciable porque esa concentración ya es suficiente para producir un pH de 9,39 en agua pura a la presión de  $\text{CO}_2$  atmosférica (Nakayama, 1970).

Tomando como referencia el Extracto de Saturación

(ES) de 50-60 cm, que contiene  $10,90 \text{ mmol}_{(+)} \text{ l}^{-1}$  de  $\text{NaHCO}_3$  (Cuadro 4), aplicando el procedimiento de Nakayama (1970) se obtendría un pH de 9,19 si se tuviese esa cantidad de sal en agua pura a la presión de  $\text{CO}_2$  atmosférico; valor que es ligeramente superior al de 8,95 (Cuadro 2) obtenido en pasta saturada (PS) para esa misma profundidad. Esta pequeña discrepancia podría ser atribuida al efecto de la fuerza iónica (la solución del suelo tiene otros iones, como  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , que tienden a reprimir la hidrólisis de los carbonatos), la presión de  $\text{CO}_2$  en la pasta puede ser diferente de la atmosférica (aunque con esa concentración se requeriría casi el doble de la presión del  $\text{CO}_2$  atmosférico para bajar el pH hasta 8,95), al hecho de que el pH se midió en pasta (no en el extracto) o al hecho que se está obviando la acción del suelo como intercambiador.

Guerrero-Alves *et al.* (2004) usaron regresión lineal múltiple para correlacionar el contenido de Naint en un Typic Natrustalf de Guárico-Venezuela con la cantidad de sales solubles de sodio (bicarbonatos, carbonatos y cloruros) y la CIC. Mostraron un coeficiente de correlación ( $r$ ) elevado que les permitió estimar el 75% de los valores de Naint con un error  $<6\%$ . La correlación simultáneamente positiva con la CIC y al concentración de sales alcalinas de sodio y negativa con la concentración de  $\text{NaCl}$ , la emplearon como base para sugerir que la sodificación progresiva del perfil por ellos estudiado tomó lugar a medida que se acumulaban sales alcalinas de sodio y los cloruros eran eliminados del sistema a través del drenaje profundo. Usando las mismas premisas y un procedimiento similar, se obtuvo para el suelo Papelón la siguiente ecuación de regresión lineal múltiple ( $r = 0,9099$ ):

$$\text{Na}_{\text{int}} = -2,5621.[\text{NaCl}] + 0,3625.[\text{NaHCO}_3 + \text{Na}_2\text{CO}_3] + 0,0905.\text{CIC} + 1,6915 \quad (7)$$

**CUADRO 4.** Conductividad hidráulica (K), densidad aparente ( $D_a$ ) por el método del hoyo, macroporosidad (MP) y porosidad total (PT) determinadas para horizontes genéticos descritos en el suelo Papelón.

| Horizonte | profund.<br>cm | K*<br>----- $\text{mm h}^{-1}$ ----- | $D_a$<br>----- $\text{Mg m}^{-3}$ ----- | MP*<br>----- % ----- | PT*      |
|-----------|----------------|--------------------------------------|---|----------------------|----------|
| Ap        | 0-10           | 16±11                                | 1,47                                    | 10,6±0,5             | 49,6±0,9 |
| En        | 10-20          | 11±5                                 | 1,52                                    | 7,9±1,0              | 43,8±2,4 |
| Btn1      | 20-56          | 0                                    | 2,03                                    | 3,1±0,2              | 40,4±1,3 |
| Btn2      | 56-104         | 0,5±0,9                              | 1,89                                    | 3,4±0,1              | 45,7±1,0 |
| 2Cn       | 104-200        | 0                                    | 1,85                                    | 3,3±0,2              | 46,2±2,3 |

\*Promedio de tres determinaciones + desviación estándar.

**CUADRO 5.** Iones solubles\* y sales solubles determinadas en los extractos de saturación, cada 10-cm, en el suelo Papelón y en aguas de riego<sup>§</sup>.

| Profund.<br>(cm) | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Ca+Mg | Na <sup>+</sup> | mmol(+) l <sup>-1</sup> |      |      |      |       |      |  |
|------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------|-----------------|-------------------------|------|------|------|-------|------|--|
|                  |                               |                 |                               |       |                 | K <sup>+</sup>          | CaB  | NaCl | NaS  | NaB   | KCl  |  |
| 0-10             | 1,44                          | 1,20            | 1,15                          | 3,24  | 2,48            | 1,61                    | 2,12 | 0,54 | 1,34 | 0,00  | 1,22 |  |
| 10-20            | 4,04                          | 0,90            | 0,65                          | 0,59  | 5,68            | 0,23                    | 0,55 | 0,76 | 0,71 | 3,82  | 0,22 |  |
| 20-30            | 8,60                          | 1,00            | 0,94                          | 0,69  | 10,94           | 0,25                    | 0,65 | 0,83 | 1,00 | 8,50  | 0,24 |  |
| 30-40            | 14,14                         | 1,00            | 0,93                          | 0,99  | 15,14           | 0,27                    | 0,98 | 0,75 | 0,94 | 13,31 | 0,27 |  |
| 40-50            | 14,72                         | 1,00            | 0,61                          | 0,79  | 15,53           | 0,24                    | 0,79 | 0,77 | 0,62 | 14,04 | 0,24 |  |
| 50-60            | 11,44                         | 0,90            | 0,45                          | 0,69  | 12,18           | 0,23                    | 0,68 | 0,69 | 0,46 | 10,90 | 0,23 |  |
| 60-70            | 11,46                         | 1,00            | 0,90                          | 0,69  | 13,01           | 0,25                    | 0,68 | 0,78 | 0,92 | 11,04 | 0,25 |  |
| 70-80            | 8,56                          | 0,70            | 0,44                          | 0,59  | 8,96            | 0,24                    | 0,59 | 0,47 | 0,44 | 8,02  | 0,24 |  |
| 80-90            | 9,16                          | 0,70            | 0,29                          | 0,59  | 9,92            | 0,24                    | 0,59 | 0,47 | 0,30 | 8,67  | 0,24 |  |
| 90-100           | 9,24                          | 1,00            | 0,33                          | 0,59  | 9,74            | 0,24                    | 0,59 | 0,76 | 0,33 | 8,65  | 0,24 |  |
| 100-110          | 8,80                          | 0,80            | 0,34                          | 0,69  | 9,74            | 0,23                    | 0,67 | 0,61 | 0,35 | 8,46  | 0,22 |  |
| 110-120          | 6,80                          | 0,70            | 0,36                          | 0,59  | 7,39            | 0,24                    | 0,58 | 0,48 | 0,37 | 6,38  | 0,24 |  |
| 120-130          | 7,36                          | 0,70            | 0,31                          | 0,59  | 7,68            | 0,24                    | 0,59 | 0,47 | 0,32 | 6,84  | 0,24 |  |
| 130-140          | 5,36                          | 0,60            | 0,33                          | 0,59  | 5,79            | 0,22                    | 0,58 | 0,40 | 0,34 | 4,92  | 0,22 |  |
| 140-150          | 2,64                          | 0,30            | 0,36                          | 0,39  | 3,37            | 0,24                    | 0,36 | 0,11 | 0,40 | 2,57  | 0,22 |  |
| 150-160          | 3,04                          | 0,30            | 0,31                          | 0,59  | 3,77            | 0,27                    | 0,53 | 0,10 | 0,35 | 2,92  | 0,24 |  |
| 160-170          | 1,88                          | 0,30            | 0,22                          | 0,39  | 2,64            | 0,23                    | 0,34 | 0,16 | 0,26 | 1,88  | 0,20 |  |
| 170-180          | 3,40                          | 0,40            | 0,33                          | 0,39  | 3,72            | 0,24                    | 0,38 | 0,18 | 0,34 | 3,11  | 0,24 |  |
| 180-190          | 4,56                          | 0,50            | 0,34                          | 0,49  | 4,55            | 0,23                    | 0,50 | 0,26 | 0,34 | 4,01  | 0,24 |  |
| 190-200          | 4,84                          | 0,50            | 0,33                          | 0,30  | 4,60            | 0,23                    | 0,32 | 0,24 | 0,32 | 4,30  | 0,24 |  |
| 200-210          | 3,68                          | 0,50            | 0,17                          | 0,39  | 3,80            | 0,21                    | 0,39 | 0,30 | 0,17 | 3,31  | 0,21 |  |
| 210-220          | 2,08                          | 0,30            | 0,26                          | 0,30  | 2,68            | 0,23                    | 0,28 | 0,12 | 0,29 | 2,03  | 0,21 |  |
| 220-230          | 2,80                          | 0,75            | 0,24                          | 0,99  | 3,44            | 0,25                    | 0,90 | 0,62 | 0,27 | 2,24  | 0,23 |  |
| 230-240          | 3,68                          | 0,50            | 0,24                          | 0,30  | 3,74            | 0,23                    | 0,31 | 0,26 | 0,24 | 3,32  | 0,24 |  |
| 240-250          | 4,12                          | 0,60            | 0,28                          | 0,49  | 4,22            | 0,23                    | 0,50 | 0,37 | 0,28 | 3,60  | 0,23 |  |
| <b>agua1</b>     | 2,10                          | 0,14            | 0,65                          | 2,52  | 0,23            | 0,27                    | 8,83 | 0,59 | 0,97 | 0,00  | —    |  |
| <b>agua2</b>     | 2,10                          | 0,14            | 0,65                          | 0,60  | 2,15            | 0,27                    | 0,60 | 0,66 | 3,05 | 7,04  | —    |  |

\* Promedio de tres determinaciones

§ **agua1**: Canal del sistema de riego del río Guanare; **agua2**: agua hipotética, tomando como base el **agua1**, asumiendo una cantidad de carbonato de sodio residual (CSR) de 1,50 mmol<sub>(+)</sub> l<sup>-1</sup>. Para las aguas, las sales solubles se refieren a las pronosticadas en el extracto de saturación por el modelo predictivo de sodicidad-salinidad de Pla (1988). No incluida en el Cuadro 4, en el **agua1** se pronostica una [CaSO<sub>4</sub><sup>+</sup>MgSO<sub>4</sub>] de 1,77 mmol<sub>(+)</sub> l<sup>-1</sup>. Para ambas aguas se corrió el modelo sumando el contenido de potasio al contenido de sodio. En el **agua1** no se pronostica precipitación de sales mientras que en el **agua2** se prevé precipitación de carbonatos.

donde los corchetes [ ] hacen referencia a las concentraciones de las especies químicas en  $\text{mmol}_{(+)} \text{L}^{-1}$ . La ecuación 7 permitió, en este caso, estimar el 75% de los valores de  $\text{Na}_{\text{int}}$  (Cuadro 2) pero sólo con un error <12%. Sin embargo, es de hacer notar que los valores de  $\text{Na}_{\text{int}}$  en Papelón fueron mucho menores que los del suelo sódico de Guerrero-Alves *et al.* (2004) y, en consecuencia, cabría esperar que estuviesen afectados por mayores errores relativos. Por otra parte, quedó también de manifiesto la correlación positiva con la cantidad de  $\text{NaHCO}_3$  y negativa con la  $[\text{NaCl}]$  lo que permite reforzar la tesis de que la sodificación de un perfil de suelo parece estar relacionada a la acumulación de sales alcalinas de sodio y la eliminación de  $\text{NaCl}$  (y tal vez sulfatos) a través del drenaje profundo.

Para el pedón sódico Papelón, la recta de regresión entre los valores de relación de sodio intercambiable (RSI) y RAS (no estudiada en este trabajo) produjo un coeficiente de selectividad de Gapon (KG) de 0,03030  $(\text{mmol l}^{-1})^{-1/2}$ , el cual difiere en más de 100% del valor de 0,01475  $(\text{mmol l}^{-1})^{-1/2}$  señalado por el Salinity Laboratory Staff (1954). Por esta razón, no es posible inferir los valores de PSI directamente a partir de los valores de RAS (Cuadro 2) sugiriendo este hecho, además, la acumulación de sales de sodio con hidrólisis alcalina; tal como fue corroborado. Cuando este tipo de sales se acumulan, los KG (y por consiguiente los PSI) son sustancialmente mayores (Guerrero-Alves *et al.*, 2002) y no se debería estimar el PSI directamente a partir de los valores de RAS (Bohn, 1979; Guerrero-Alves *et al.*, 2002, 2007).

**Composición mineralógica.** El análisis mineralógico de la arcilla y de la fracción densa de las arenas está resumido en los Cuadros 6 y 3. En orden decreciente de abundancia, los 4 minerales principales de la fracción arcilla son: micas, cuarzo, clorita+interestratificado 10/14m y feldespatos (Cuadro 6). En conjunto, estos 4 minerales constituyen casi un 80% del total y, por su naturaleza, indican que el suelo presenta un bajo grado de evolución o desarrollo pedogenético.

Las micas, el mineral con la mayor contribución porcentual de la arcilla, con cantidades que no superan el 7% en el **Ap**, se incrementa abruptamente en los 3 horizontes subyacentes (**En**, **Btn1** y **Cn**) a valores entre 29-38%. Los relativamente bajos contenidos de micas y trazas de feldespatos en el **Ap**, conjuntamente con la elevada concentración de cuarzo (mineral relativamente resistente) en este horizonte, es consistente con el

proceso de ferrólisis, descrito más adelante, que conlleva a la destrucción de arcilla. Otra especie presente en cantidades importantes en este suelo (16-24%) corresponde al interestratificado 10/14m; cuya resolución del pico de difracción de la clorita fue imposible presentándose como un complejo mineral. Esto sugiere la posibilidad de propiedades expansibles en este pedón. El coeficiente de expansibilidad lineal (COEL) para el horizonte **Btn1**, no señalado aquí, fue de 0,06 y es lo suficientemente elevado como para reflejar algún tipo de expansibilidad. Aunque la expansibilidad puede usarse para justificar las pobres condiciones hidráulicas en este pedón, un mecanismo más efectivo, porque no es reversible, corresponde al taponamiento de poros. Sin embargo, llama la atención la ausencia de caolinita en todos los horizontes considerados. La caolinita es un mineral muy susceptible para la dispersión y, en consecuencia, para la obturación de los poros.

**CUADRO 6.** Mineralogía de la arcilla para horizontes seleccionados en el suelo Papelón, obtenidos por difracción de rayos X.

| Mineral               | Ap | En | Horizontes |     |
|-----------------------|----|----|------------|-----|
|                       |    |    | Btn1       | 2Cn |
| ----- % -----         |    |    |            |     |
| clorita+int.10/14m*   | 20 | 24 | 21         | 16  |
| cuarzo                | 47 | 14 | 15         | 20  |
| feldespatos           | t  | 9  | 8          | 15  |
| goethita              | 6  | 4  | 2          | 2   |
| int.10/14v*           | 0  | 3  | 1          | 1   |
| int.10/14c*+sepiolita | t  | 3  | 2          | 1   |
| lepidocrocita         | 5  | 6  | 4          | 4   |
| micas                 | 7  | 29 | 38         | 31  |
| paligorsquita         | 9  | 4  | 5          | 4   |
| pirofilita            | 1  | 1  | 1          | 2   |
| talco                 | 5  | 2  | 3          | 3   |

\*int.: interestratificado; c: clorita; m: montmorillonita (esmeclita); v: vermiculita; t: trazas.

Los feldespatos, minerales altamente susceptibles de alteración, presentan cantidades relativamente elevadas (entre 9-15%) en los horizontes **En**, **Btn1** y **Cn** (Cuadro 6) lo que refleja el poco grado de evolución pedológica. Por otra parte, los difractogramas de rayos

X para el pedón Papelón también revelaron la posible presencia de paligorsquita, lepidocrocita, goethita, talco, pirofilita, sepiolita e interstratificados 10/14c y 10/14v (Cuadro 6). No obstante, sus contribuciones porcentuales fueron relativamente bajas y no superaron el 6% en ningún caso. La lepidocrocita se detectó en todos los horizontes de este pedón y es indicadora de condiciones hidromórficas, producto del mal drenaje, en medios no calcáreos (Schwertmann y Taylor, 1977). Su presencia corrobora el carácter secundario del  $\text{CaCO}_3$  precipitado en Papelón.

Las arenas densas del pedón sódico Papelón, a pesar de ser relativamente diversas mineralógicamente, sólo presentan cantidades pequeñas de minerales susceptibles a la alteración. La alta proporción de opacos (especialmente en los horizontes **Ap**, **En** y **Btn1**) y minerales resistentes como circón y turmalina sugieren, a diferencia de la mineralogía de las arcillas, un alto grado de evolución de los sedimentos que dieron origen a este suelo (Cuadro 3). En cuanto a los minerales, se identificaron nesosilicatos (cianita, circón y granate), sorosilicatos (epidota y zoisita), ciclosilicatos (turmalina), piroxenos (augita), anfíboles (hornblenda, tremolita), filosilicatos (principalmente biotita) y óxidos (rutilo).

Entre los nesosilicatos, sólo el circón se presenta en cantidades importantes. Este mineral resistente presenta contenidos que se incrementan apreciablemente desde el **Ap** hasta el **En**, para luego disminuir sustancialmente en el **Btn1**; lo cual es consistente con la definición del horizonte **En** (Soil Survey Staff, 1975). Los sorosilicatos, epidota y zoisita, se presentan en cantidades comparables en el **Ap** (2,4%) disminuyendo apreciablemente en el horizonte **En**; lo cual es también un reflejo de los procesos intensos de transformación y lavado que ocurren en este horizonte del suelo. Entre los piroxenos y los anfíboles sólo la hornblenda se presentó en todos los horizontes y en cantidades que algunas veces superaron el 1% (Cuadro 3).

Las micas fueron los únicos filosilicatos detectados en las arenas densas de Papelón. Las micas corresponden a una de las 2 especies minerales, conjuntamente con los opacos, que superan el 6% en todos los horizontes considerados. Su contenido aumenta abruptamente en el **Cn** y éste coincide con el drástico decrecimiento del contenido de opacos. Por tanto, se sugiere que el aporte de materiales para dar origen a este pedón tiene una naturaleza diferente (discontinuidad litológica) siendo los que constituyen el **Cn**, paradójicamente, "menos evolucionados" cuando se comparan con los que dieron

origen al solum suprayacente. Otras evidencias que también apoyan esta conclusión son la ausencia de circón y turmalina y el enriquecimiento relativo con hornblenda que se presentan en el **Cn**. La proporción de intemperismo (Cuadro 3) y la suma de los porcentajes de arena fina más arena muy fina (af+amf), sobre base libre de arcilla (Cuadro 2), las cuales pueden emplearse como pruebas de uniformidad de materiales parentales, también son consistentes con estos resultados.

**Procesos pedogenéticos y génesis del suelo.** La acidificación en el horizonte **Ap**, observada también en un suelo sódico alcalino de Guárico (Guerrero-Alves *et al.*, 2004), puede ser atribuida al fenómeno de ferrólisis (Brinkman, 1970), el cual finalmente produce destrucción y posterior migración de arcilla fina. El proceso total, donde intervienen principalmente el hierro y las especies cambiables ácidas ( $\text{H}^+$  y  $\text{Al}^{3+}$ ) y básicas ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ) del suelo, consiste en una sucesiva y alternada secuencia de reacciones de oxidación-reducción como respuesta a ciclos de secado-humedecimiento-lixiviación en el suelo y ha sido explicada en detalle en varias publicaciones previas (Schargel, 1984; Schargel *et al.*, 1988; Soil Survey Staff, 1999; Guerrero-Alves *et al.*, 2004). Además del pH ácido en el horizonte **Ap** (Cuadro 2), la presencia de abundantes nódulos de Fe-Mn en la base del **En** (20 cm; Cuadro 1), conjuntamente con los contenidos muy bajos de mica y feldspatos y la concentración de cuarzo (relativamente resistente a la intemperización) que revelaron los difractogramas de la arcilla en el **Ap** (Cuadro 6), podrían considerarse como evidencia adicional del proceso de ferrólisis en Papelón.

La taxonomía de suelos (Soil Survey Staff, 1975) refiere que los carbonatos de iones divalentes (agentes cementantes) parecen efectivos en frenar el movimiento de la arcilla porque las acumulaciones sólo son comunes por encima de horizontes que tienen grava calcítica en una matriz no calcárea o en ausencia de carbonatos finamente divididos diseminados en la matriz del suelo. Por su reactividad frente al **HCl**, se evidencia una marcada precipitación de carbonatos, bajo la forma de masas pulverulentas blandas y pseudomicelios, en el **Btn1** a la profundidad de 40-50 cm (Cuadro 1). Otra precipitación concentrada y similar de carbonatos, también claramente visible, pero, menos expresiva, se encontró en el **Cn** hacia el fondo de la calicata a la profundidad de 180-190 cm (Cuadros 1 y 2). La función de profundidad de la CIC tiene un incremento muy abrupto hacia los 150-160 cm de profundidad y una "barriga" de arcilla que coincide en gran medida con la precipitación de

carbonatos a los 180-190 cm. Esto permite suponer que, por debajo de los 160 cm, se esté posiblemente en la presencia de un suelo enterrado.

Basado en estos hechos, la iluviación de arcilla en Papelón sólo pudo ocurrir antes de la precipitación de carbonatos. Estos carbonatos parecen estar constituidos por una mezcla de  $\text{CaCO}_3$ - $\text{MgCO}_3$ , aunque dominada por el primero, ya que el Ca total extraído con acetato de sodio (NaAc) a pH 5 es muy similar al Mg total en la mayoría de las muestras (Guerrero-Alves, 1998). Como en este pedón no existe reacción al HCl en la masa del suelo en parte alguna del perfil, sólo en las masas pulverulentas blandas y pseudomicelios, se infiere que los materiales parentales no son calcáreos y que estos carbonatos precipitados deben tener un origen secundario y que no interfirió con el proceso anterior de migración de la arcilla. Por tanto, la iluviación de arcilla, entre 20-104 cm de profundidad, debe ser de origen pedogenético porque está apoyada por las pruebas de uniformidad de los materiales parentales discutida con anterioridad.

Por otra parte, considerando las deficientes condiciones hidráulicas actuales (Cuadro 4) que mantiene el pedón Papelón en el Btn y en el Cn, la iluviación de la arcilla sólo pudo manifestarse en condiciones en las cuales se mantuvieron ausente estas restricciones para la circulación del agua. La función de profundidad de la CE del ES (Cuadro 2), si bien se incrementa algo hasta los 50 cm, aunque siempre por debajo de la mitad del límite para salinidad ( $4 \text{ dS m}^{-1}$ ; Salinity Laboratory Staff, 1954), disminuye a valores relativamente muy bajos con la profundidad. Esto hace poco probable que el suelo fuese inicialmente salino-sódico, tal como lo sugieren Shargel *et al.* (1988), en la etapa donde se iluvió la arcilla y necesariamente con mejores propiedades hidráulicas. En consecuencia, una salinidad de origen para explicar la buena agregación del suelo y una adecuada migración de la arcilla en la etapa de formación del argílico, antes de convertirse en nátrico, no parece plausible.

Papelón se encuentra dentro de una planicie muy plana, con pendiente general de 0,2%, caracterizada por una microtopografía de bancos y bajíos (predominantes) donde estos últimos se encharcan durante el período lluvioso y cuya diferencia de elevación entre ellos no supera 1 m (Schargel *et al.*, 1988). Para una situación topográfica similar aunque muy distante geográficamente, Pla Sentís *et al.* (2003) mostraron que durante los últimos 8000 años, coincidente con el Holoceno actual (Ortiz-Jaureguizar y Cladera, 2006), parte de los suelos en la región noroccidental del Ganges (India)

desarrollaron horizontes de iluviación de arcilla y acumularon  $\text{CaCO}_3$  de origen pedogenético y sales de sodio con hidrólisis alcalina. La gran sodicidad (en profundidad) en los suelos de las microdepressiones, que contrasta con una más baja (sólo en el subsuelo) en las microelevaciones asociadas, les permitió sugerir un control microtopográfico de ésta producto de la tectónica del Holoceno. En este caso, las microdepressiones pudieron favorecer una mayor acumulación de sales alcalinas de sodio porque, después de precipitaciones intensas y de corta duración, podían ser sometidas a breves inundaciones que causaron muchos más ciclos de humedecimiento-secado con procesos de reducción-oxidación o de intemperización mineral.

Una de las propiedades más sorprendentes de los suelos sódicos alcalinos es el desarrollo de valores de PSI muy elevados (hasta de 100%) a pesar de presentar contenidos relativamente bajos de sodio en la solución del suelo y de la mayor afinidad por iones divalentes (Borchardt, 1989), en lugar del sodio, que tienen generalmente los materiales del suelo (especialmente las esmectitas). Una fuente potencialmente elevada de sodio en la naturaleza es el mar por lo que se ha sugerido el medio marino como un posible ambiente para la formación natural de bentonitas (esmectitas) muy sódicas (Borchardt, 1989). Sin embargo, como éste sólo presenta una concentración de  $\text{NaCl} < 1 \text{ M}$  (Borchardt, 1989), esto llevó a Guerrero-Alves *et al.* (2004) a proponer que un ambiente diferente, caracterizado por la acumulación simultánea de sales de sodio y MO en un ambiente reductor, pudiese ser la causa de formación de esmectitas y suelos con alto contenido de sodio.

La MO es la principal donadora de electrones en el suelo (Bohn *et al.*, 1979) y los sulfatos podrían ser forzados por los microorganismos del suelo a ser usados como aceptores de electrones, en condiciones fuertemente reductoras, a pesar de presentar un potencial de semi reacción más desfavorable que los óxidos y oxo-hidróxidos de Fe-Mn, (Bohn *et al.*, 1979).

La reacción propuesta por Guerrero-Alves *et al.* (2004) fue:



donde  $\text{CH}_2\text{O}$  corresponde a un carbohidrato hipotético que representa la MO del suelo. Como consecuencia de la producción y volatilización a la atmósfera del gas ácido  $\text{H}_2\text{S}$ , se incrementaría la ALCR y el pH del suelo porque el  $\text{HCO}_3^-$  producido en la reducción no podría ser neutralizado nuevamente al volver el ambiente de

oxidación. En condiciones de drenaje restringido, tal como se presenta en los bajíos, el ión bicarbonato se acumularía y su exceso haría precipitar inicialmente gran parte de los iones divalentes (Ca, Mg) como carbonatos enriqueciendo con  $\text{NaHCO}_3$  la solución resultante. Sucesivos aportes de elementos en el agua y ciclos alternos de secado y humedecimiento terminarían por concentrar aún más las sales de sodio con hidrólisis alcalina y hacer desaparecer prácticamente el Ca y el Mg de la solución del suelo. Esto favorecería, posteriormente, grandes sustituciones con sodio en el complejo de intercambio. El proceso completo se representa en la secuencia de reacciones 3, 4 y 5.

Las relativamente más pequeñas cantidades de sulfato en el perfil Papelón por debajo de los 70 cm (Cuadro 4) y la presencia de nódulos de Fe-Mn en la base del horizonte En y dispersos en la masa del horizonte Btn (Cuadro 1), pueden también apoyar la tesis de la reducción de sulfato propuesta por la reacción 8. Sin embargo, algunos autores (Pla Sentís *et al.*, 2003) han señalado que el mecanismo de reducción de sulfatos puede ser descartado en condiciones donde se presentan simultáneamente bajos contenidos de MO y de sulfato. No obstante, la evidencia negativa no es prueba de que efectivamente no haya ocurrido porque, en condiciones de drenaje restringido, tal como se analiza más adelante, sólo se requerirían muy pequeñas cantidades de ALCR en las aguas de encharcamiento para promover la acumulación en el suelo de sales de sodio con hidrólisis alcalina y precipitación de carbonatos insolubles.

Schargel *et al.* (1988) señalan que en 1982 se inició la deforestación del terreno en el cual se encuentra el pedón Papelón; donde predominaba un bosque decíduo con pequeñas áreas cubiertas por vegetación de sabana. Es presumible suponer que en estas últimas se encontraban circunscritos los pedones sódicos donde la vegetación herbácea estaba caracterizada por la presencia de *Leersia hexandra* (pasto lambedora) y *Panicum laxum* (jajato; Schargel *et al.*, 1988); ambas gramíneas perennes tolerantes al anegamiento y al sobre-pastoreo. Los niveles de carbono orgánico (CO) en los horizontes superficiales de los Natraquals (Schargel *et al.*, 1988) señalaban un contenido de entre 1 a 2,5%, es decir, de 1,7 a 4,3% de MO si se asume que en ésta existe un 58% de CO (basada en la composición elemental promedio de ácidos fúlvicos y húmicos; Hayes y Swift, 1978). Por esta razón, se infiere que el contenido de MO en Papelón pudo ser, antes de la deforestación, si no superior, por lo menos equivalente a los valores señalados por Schargel *et al.* (1988) y suficientes para una posible reducción de sulfatos.

En Venezuela, Schargel (1984) y Schargel *et al.* (1988) señalan, respectivamente, que en el Alto Apure y en la planicie aluvial del río Portuguesa los elevados contenidos de sodio intercambiable podrían estar relacionados a la acumulación de aguas, con abundante sodio, que se concentraron por evaporación en áreas depresionales. Esto favorecería la sustitución de los cationes intercambiables por sodio y daría lugar a suelos salino-sódicos durante el período árido que marca el final del Pleistoceno; unos 10 000 años antes de nuestra era (Ortiz-Jaureguizar y Cladera, 2006). Sin embargo, tal como se discutió con anterioridad, la función de profundidad de la CE del ES para Papelón, que corresponde a un Natraqualfs perteneciente a la misma asociación de Alfisoles considerada por Schargel *et al.* (1988) en esta área, es poco probable que haya tenido salinidad de origen. Por tanto, se cree que la sal predominante en estas aguas con enriquecimiento relativo en sodio y que interaccionaron con los materiales parentales de Papelón, en un ambiente más bien de baja salinidad, debió ser el bicarbonato de sodio. El origen de esta sal pudo ser la ya referida reducción de sulfatos o la intemperización de minerales como silicatos y carbonatos presentes en el material parental.

Mahaney *et al.* (2007a) estudiaron una cronosecuencia (Pleistoceno tardío-Holoceno) de suelos pertenecientes a una terraza fluvial en la región norte de los Andes venezolanos donde las rocas dominantes son granito y gneiss. La superficie más vieja en la cronosecuencia exhibió un análisis elemental caracterizado por tenores mucho menores de Ca y Na (sin K) que los otros perfiles más jóvenes (K y Na, ambos, ~ 1%); lo que parece indicar un elevado grado de intemperización de los materiales que dieron lugar a los suelos más evolucionados. La ausencia de K en la superficie de intemperización más antigua es coincidente con la observación de Gérard *et al.* (2003) de que la mineralogía de un suelo marrón ácido por ellos estudiado sugiere que los feldespatos potásicos se intemperizan mucho más rápido que la albita (feldespato sódico) y la moscovita. En consecuencia, también es plausible la liberación de  $\text{NaHCO}_3$  en las aguas que en el pasado bajaron del núcleo cristalino de los Andes y que, posteriormente, como aguas de desborde irrigaron la planicie aluvial del río Portuguesa.

La composición de un agua recolectada en período seco, a partir de un canal del sistema de riego del río Guanare (estado Portuguesa), reveló que el ión  $\text{HCO}_3^-$  se encontraba en una proporción 2,66 veces mayor que la de los

otros aniones (Cuadro 5); en concordancia con lo señalado por Lerman *et al.* (2007) de que éste es el anión principal en las aguas de ríos. Sin embargo, no reveló la presencia de bicarbonato de sodio (sólo pequeñas cantidades de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). Si asumimos que la composición de dicha agua, ya que fue obtenida en el período de estiaje, refleja condiciones áridas pasadas en la zona, entonces se requerirían muchos ciclos de humedecimiento y secado en el suelo para obtener, en principio, una composición que refleje la producción de bicarbonato de sodio en el ES.

Para averiguar si esto es posible se utilizó la composición del agua del río Guanare en un modelo predictivo de salinidad-sodicidad (Pla Sentís, 1988) para pronosticar la composición de sales (especiación) del ES empleando la conductividad hidráulica del horizonte Btn2 (Cuadro 4) y los niveles de sales y RAS correspondientes a la profundidad de 50-60 cm del suelo Papelón (Cuadro 2) como valores límites. Los resultados señalaron que no existiría precipitación de carbonatos, contrario a lo que se presenta en Papelón, y la especiación obtenida para el ES distó mucho de ser la esperada (Cuadro 5). En consecuencia, se infiere que la composición de esta agua difiere de la que, en contacto con los materiales parentales, dio lugar a este pedón sódico alcalino.

Por otra parte, si se prueba el modelo tomando como base la misma agua, pero, modificando hipotéticamente los contenidos de  $\text{Ca}^+\text{Mg}$  y  $\text{Na}^+$ , dejando inalterada la suma de cationes y de aniones para tener una ALCR de  $1,50 \text{ mmol}_{(+)} \text{ l}^{-1}$  (es decir, con  $\text{NaHCO}_3$ ), se prevé la precipitación de carbonatos tal como ocurre en Papelón. Además, la composición pronosticada para el ES es muy similar (excepto por la cantidad algo elevada de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) a la del que se tomó como referencia para correr el modelo (la profundidad de 50-60 cm) tal como se aprecia en el Cuadro 5.

Otras corridas del modelo, no publicadas aquí, dan siempre cuenta de la precipitación de carbonatos de  $\text{Ca-Mg}$  y de cantidades apreciables de  $\text{NaHCO}_3$  en el ES para valores de ALCR en el agua de irrigación (o de desborde) tan bajas como  $0,1 \text{ mmol}_{(+)} \text{ l}^{-1}$ . Esto parece señalar que en condiciones de drenaje restringido la génesis de suelos sódicos alcalinos es posible para materiales parentales que interaccionan con aguas que presentan esta sal aún en cantidades tan bajas como  $0,1 \text{ mmol}_{(+)} \text{ l}^{-1}$ .

Otro aspecto a considerar es si la intemperización de los silicatos pudo ocurrir a una tasa tan elevada como para producir aguas relativamente concentradas en

$\text{NaHCO}_3$  durante el período árido que marca el final del Pleistoceno; tal como sugieren Schargel *et al.* (1988). Dicho período no sólo fue más seco sino también más frío que el Holoceno actual. Un estimado de temperaturas para el último máximo glacial (UMG) en los Andes venezolanos (~22 750 a 19 960 años AP) se sitúa, en promedio, casi en los  $9^\circ\text{C}$  por debajo de las actuales (Stansell *et al.*, 2007).

Por otra parte, Mahaney *et al.* (2007b) también señalan la posible existencia de un período de avance de los glaciares andinos, que coincide con el período de enfriamiento Younger Dryas (YD), mucho más reciente y que tiene una data de aproximadamente 12 400 años AP. Por tanto, es previsible pensar que la energía disponible para la activación de la disolución de los silicatos y carbonatos fuese más baja en estos casos. No obstante, aunque igualmente existen datos que apoyan lo contrario (Lerman *et al.*, 2007), algunos estudios con modelos de circulación global señalan que el consumo total de  $\text{CO}_2$  en la intemperización de las rocas, y consecuentemente en el flujo de  $\text{HCO}_3^-$ , fue mayor en el UMG que en el período actual basado en la mayor área superficial de las partículas minerales producto del efecto de trituration (Lerman *et al.*, 2007) y cizalla del hielo. Lerman *et al.* (2007) señalan, además, la existencia de estudios de campo y laboratorio que refieren que los glaciares pueden producir cantidades importantes de minerales con área superficial elevada que incrementarían el flujo de intemperización de los silicatos.

Por otra parte, Stansell *et al.* (2007) expresan que durante el UMG en Venezuela, la altitud de la línea de equilibrio de los glaciares (ALEG) estuvo entre 850 a 1 420 m por debajo de la actual mientras que para el YD, Mahaney *et al.* (2007b) asimismo refieren que la ALEG apenas se situó 50 m por encima de la que correspondió al UMG en los Andes del noroeste venezolano. Esto significa que durante el UMG del Pleistoceno, y el más reciente y transicional YD, los materiales trabajados por la acción del hielo se hicieron más susceptibles de ser intemperizados y pudieron estar más cerca de lo que se encuentra hoy en día el núcleo cristalino de la cordillera de los Andes.

Esto facilitó la intemperización, acarreo y deposición posterior de estos materiales en la planicie aluvial del río Portuguesa durante el período más húmedo (Schargel, 1984; Schargel *et al.*, 1988; Ortiz-Jaureguizar y Cladera, 2006) y más cálido del Holoceno. En este período, durante la génesis del suelo, la acumulación de arcilla iluviada retardo gradualmente la percolación vertical del agua en el perfil (Bockheim *et al.*, 2005)

haciendo posible que, al alcanzarse niveles críticos de reducción, con aguas que presentaban un contenido relativamente elevado de ALCR producto de las más elevadas tasas de intemperización por las temperaturas más cálidas, llevaran a la acumulación de sales de sodio con hidrólisis alcalina en las áreas con drenaje restringido.

Una vez acumuladas, las sales alcalinas de sodio alteraron las relaciones de selectividad del suelo por iones divalentes reduciendo su competencia, con relación al sodio, porque estos precipitaron bajo la forma de carbonatos y permitieron que el sodio se sustituyera amplia y progresivamente en los sitios de intercambio. Otra consecuencia de la acumulación de las sales alcalinas de sodio fue la de promover también la dispersión y expansión de las partículas coloidales del suelo que resultó en elevadas  $D_a$  y reducción aún mayor de la conductividad hidráulica del suelo, y consecuentemente de la macroporosidad, hasta hacerlo prácticamente impermeable (degradación de la estructura).

## CONCLUSIONES

- Se infiere que el futuro material parental del suelo Papelón fue producto, primero, de la acción de trituration del hielo glacial en los Andes venezolanos, durante el período árido y frío de finales del Pleistoceno y del transicional YD, que produjo materiales con mayor área superficial y, en consecuencia, con mayor susceptibilidad para la intemperización.
- Posteriormente, estos materiales fueron acarreados y depositados por la acción de cursos de agua en la actual planicie aluvial del río Portuguesa durante el período Holoceno más húmedo.
- Allí interaccionaron con aguas que concentraron bicarbonato de sodio en las microdepresiones. Estas sales pudieron haber sido producto de la intemperización, por parte del  $\text{CO}_2$  atmosférico, de feldspatos sódicos (y carbonatos no necesariamente sódicos) contenidos en las rocas de la cuenca de ablación (alcalinidad de origen) o en los sedimentos.
- La concentración en el suelo se hizo a través de numerosos ciclos de secado y humedecimiento en las microdepresiones. Por otra parte, también existe la posibilidad de que éstas fueran parcialmente favorecidas por la acumulación de MO en un ambiente reductor que eliminó gran parte de los sulfatos como  $\text{H}_2\text{S}$  y produjo una ALCR *in situ*. Para

cualquiera de las 2 posibles situaciones anteriores, la evolución del suelo durante el Holoceno permitió la migración de arcilla (formación del argílico) hasta reducir gradualmente el movimiento vertical del agua en el suelo, la sustitución progresiva de iones divalentes por sodio en el complejo de cambio dando lugar al horizonte nátrico, la precipitación de  $\text{CaCO}_3$  y, finalmente, cuando la combinación de sales totales y RAS (o PSI) alcanzó niveles críticos, por la eliminación de sales a través del drenaje, ocurrió la degradación de la estructura.

## AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al Dr. Graciano Elizalde por su colaboración en la interpretación de los espectros de difracción de rayos X y en la identificación de los minerales de las arenas densas, al Dr. Richard Schargel por la clasificación taxonómica del perfil y a la Universidad Rómulo Gallegos, a la Universidad Central de Venezuela por su apoyo logístico.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aleixandre, T. y A. Pinilla. 1968. Algunas modificaciones a las técnicas aplicadas al estudio mineralógico de fracciones gruesas o arenas. *Anales de Edafología y Agrología*. Tomo XXVII. Número 7-8, pp. 563-567.
- Bockheim, J. G., A. N. Gennadiyev, R. D. Hammer and J. P. Tandarich. 2005. Historical development of key concepts in pedology. *Geoderma* 124: 23-36.
- Bohn, H. L., B. L. McNeal and G. E. O'Connor. 1979. *Soil Chemistry*. 1ra ed. John Wiley & Sons, New York, pp. 329.
- Borchardt, G. 1989. Smectites. **In:** 'Minerals in Soil Environments' (Dixon y Weed ed.), Cap. 14, 2da ed. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin. pp. 675-727.
- Brinkman, R. 1970. Ferrolisis, a hydromorphic soil forming process. *Geoderma* 3, 199-206.
- Comerma, J. A. y L. F. Arias. 1974. Consideraciones sobre el recurso suelo en las zonas áridas y semi-áridas de Venezuela. **In:** III Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo. Mérida. 19 pp.

- Cruz-Romero, G. and N. T. Coleman. 1975. Reactions Responsible for High pH of Na-saturated Soils and Clays. *J. Soil Sci.* 26(2):169-175.
- García-Miragaya, J., R. Schargel, M. Ramia and L. Martín. 1990. Chemical Properties of soils where Palm Trees Grow in Venezuela. *Commun. in Soil Sci. Plant Anal.* 21:337-349.
- Guerrero-Alves, J. 1998. Génesis de Suelos Sódicos en Diferentes Ambientes Edafoclimáticos de Venezuela. Tesis Doctoral. Maracay, Ven. Universidad Central de Venezuela. 237 pp.
- Guerrero-Alves, J., I. Pla-Sentís, and R. Camacho. 2002. A model to explain high values of pH in an alkali sodic soil. *Scientia Agricola* 59(4):763-770.
- Guerrero-Alves, J., I. Pla-Sentís y R. Camacho. 2004. Génesis de un suelo sódico alcalino en Chaguaramas, estado Guárico, Venezuela. *Agronomía Trop.* 54(4):433-459.
- Guerrero-Alves, J., I. Pla-Sentís, R. Camacho, A. Valera y J. Ferrer. 2007. Génesis de un suelo salino sódico de Tucupido, Estado Guárico-Venezuela. *Agronomía Trop.* 57(3):171-188.
- Gupta, R. K. and I. P. Abrol. 1990. Reclamation and management of alkali soils. *Indian J. Agric. Sci.* 60 (1):1-16.
- Hayes, M. H. B. and R. S. Swift. 1978. The chemistry of soil organic colloids. In: 'The Chemistry of Soil Constituents' (Greenland y Hayes ed.), Cap. 3, 1ra ed. Wiley-Interscience Publication, William Clowes & Sons, Londres. pp. 179-320.
- Jackson, M. L. 1969. Soil chemical analysis advanced course. 2 da ed. M. L. Jackson, USA.
- Jin, H., P. Plaha, J. Y. Park, C. P. Hong, I. S. Lee, Z. H. Yang, G. B. Jiang, S. S. Kwak, S. K. Liu, J. S. Lee, Y. A. Kim and Y. P. Lim. 2006. Comparative EST profiles of leaf and root of *Leymus chinensis*, a xerophilous grass adapted to high pH sodic soil. *Plant Science* 170:1 081-1 086.
- Lerman, A., L. Wu and F. T. Mackenzie. 2007. CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> consumption in weathering and material transport to the ocean, and their role in the global carbon balance. *Marine Chemistry* 106:326-350.
- Mahaney, W.C., R. W. Dirszowsky, M. W. Milner, R. Harmsen, S. A. Finkelstein, V. Kalm, M. Bezada and R. G. V. Hancock. 2007a. Soil stratigraphy and plant-soil interactions on a Late Glacial-Holocene fluvial terrace sequence, Sierra Nevada National Park, northern Venezuelan Andes. *J. South Am. Earth Sci.* 23: 46-60.
- Mahaney, W.C., M. W. Milner, V. Kalm, R. W. Dirszowsky, R. G. V. Hancock and R. P. Beukens. 2007b. Evidence for a Younger Dryas glacial advance in the Andes of northwestern Venezuela. *Geomorphology*, doi: 10.1016/j.geomorph.2007.08.002 (En prensa).
- Malagón, D. 1979. Fundamentos de Mineralogía de Suelos. Ira ed. Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras (CIDIAT), Mérida (Venezuela), 747 pp.
- Nakayama, F.S. 1970. Hydrolysis of CaCO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> y NaHCO<sub>3</sub> and their combinations in the presence and absence of external CO<sub>2</sub> source. *Soil Sci.* 109:391-398.
- Ortiz-Jaureguizar, E. and G. A. Cladera. 2006. Paleo-environmental evolution of southern South America during the Cenozoic. *J. Arid Envir.* 66:498-532.
- Pal, D. K., P. Srivastava, S. L. Durge and T. Bhattacharyya. 2003. Role of microtopography in the formation of sodic soils in the semi-arid part of the Indo-Gangetic Plains, India. *Catena* 51:3-31.
- Parfenoff, A., C. Pomerol et J. Tourenq. 1970. Les Minéraux en Grains. Méthodes d' étude et détermination. 6ta ed. Masson et Cie, éditeurs, París (Francia). 578 pp.
- Pla Sentís, I. 1969. Metodología de laboratorio recomendada para el diagnóstico de salinidad y alcalinidad en suelos, aguas, y plantas. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. Instituto de Edafología. Maracay, pp. 103.
- Pla Sentís, I. 1983. Metodología para la Caracterización Física con fines de Diagnóstico de Problemas de Manejo y Conservación de Suelos en Condiciones Tropicales. *Revista Alcance* N° 32:96.
- Pla Sentís, I. 1985. Origen, Distribución y Diagnóstico de Suelos Afectados por Sales en Venezuela. *Rev. Fac. Agron.* XIV (1-2):125-150.

- Pla Sentís, I. 1988. Riego y Desarrollo de Suelos Afectados por Sales en Condiciones Tropicales. *Soil Tech.* 1:13-35.
- Porta, J., M. López-Acevedo y C. Roquero. 1999. *Edafología: para la agricultura y el medio ambiente*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 849 pp.
- Robbins, C.W. 1989. Sample Preparation for Determining Ions in Dark Colored Sodic Soil Extracts. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53:721-725.
- Salinity Laboratory Staff. 1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. United States Department of Agriculture (USDA), Agriculture Handbook Nro 60. Washington, 160 pp.
- Schargel, R. 1984. Características y Génesis de Suelos con Horizontes Nátricos en el Alto Apure. *Revista Unellez de Ciencia y Tecnología, Serie Producción Agrícola* 5:85-89.
- Schargel, R., P. Arrieta y R. Sequera. 1988. Características y Manejo de una Asociación de Tropaqualfs, Haplustalfs y Natraqualfs en el Estado Portuguesa, Venezuela. *Revista Unellez de Ciencia y Tecnología* 6(1-2):9-16.
- Schwertmann, U. and R. M. Taylor. 1977. Iron Oxides. **In:** 'Minerals in Soil Environments' (ed. J.B. Dixon y S.B. Weed), Cap. 5, *Soil Sci. Soc. of America*. pp. 145-180.
- Soil Survey Division Staff. 1993. *Soil Survey Manual* USDA Handbook 18. United States department of Agriculture Soil Management Support Services. SMSS Technical Monograph N° 19. Four Edition. Virginia Polytechnic Institute and State University. 436 pp.
- Soil Survey Staff. 1975. *Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. United States Department of Agriculture. Soil Conservation Service, 754 pp.
- Soil Survey Staff. 1999. *Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. United States Department of Agriculture. Soil Conservation Service, 2nd ed.
- Soil Survey Staff. 2006. *Keys to Soil Taxonomy*. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. Tenth Edition. 341 pp.
- Stansell, N. D., P. J. Polissar and M. B. Abbott. 2007. Last glacial maximum equilibrium-line altitude and paleo-temperature reconstructions for the Cordillera de Mérida, Venezuelan Andes. *Quaternary Research* 67:115-127.
- Van Beek, C. G. and N. Van Breemen. 1973. The Alkalinity of Alkali Soils. *J. Soil Sci.* 24:129-136.