

# HIDROMORFÍA Y CONDICIONES ÁCUICAS EN SUELOS DE LA LLANURA ALUVIAL DE TUCUMÁN (ARGENTINA)

RODOLFO OSCAR ZAPPINO

Observatorio Ambiental Municipal, Laprida 854 (5000), Córdoba Capital, Argentina.  
Correo electrónico: zappinorodolfo@yahoo.com.ar

Recibido: 24-04-09

Aceptado: 22-02-10

## RESUMEN

Se seleccionaron cuatro perfiles de suelo con distinta clase de drenaje con el objetivo de analizar la intensidad del proceso de hidromorfía, y considerar cuáles cumplen con las condiciones ácuicas. Estos fueron: La Aguadita (Udipsamment típico, térmico, bien drenado), La Fronterita XI (Hapludol típico, franco grueso, illítico, térmico, moderadamente bien drenado), La Fronterita X (Argiudol ácuico, franco fino, illítico, térmico, imperfectamente drenado) y Famaillá (Argiudol ácuico, fino, illítico, térmico, imperfectamente drenado). Los suelos muestran condiciones de *endosaturación* durante seis meses al año, con un ascenso del nivel freático durante verano-otoño y un descenso en invierno-primavera. La intensidad de la reducción se evaluó en base a la distribución de hierro y manganeso secundarios asociados a los rasgos redoximórficos identificados micromorfológicamente. En los perfiles bien drenados y moderadamente bien drenados, los  $Fe_d$  y  $Mn_d$  mostraron escasa movilidad con valores entre 0,50-0,80% y 0,03-0,06%, respectivamente, y rasgos redoximórficos de escaso desarrollo con un índice  $Mn_d/Fe_d < 0,08\%$ . En los perfiles con drenaje imperfecto, el  $Fe_d$  mostró una comigración junto a la arcilla o una separación de la misma con segregación de  $Fe_d$  fuera del perfil. El  $Mn_d$  presentó valores deprimidos ( $< 0,01-0,06\%$ ), con un aumento de 0,20% en BC de La Fronterita X y un índice  $Mn_d/Fe_d = 0,33$  junto a rasgos redox más desarrollados. Este análisis sugiere que la hidromorfía aumenta desde La Fronterita XI con drenaje moderadamente bueno, a La Fronterita X y Famaillá, con drenaje imperfecto. En los dos primeros se expresa en el índice  $Mn_d/Fe_d$  y el aumento de rasgos redox en tamaño y abundancia, mientras que en el perfil Famaillá, en los valores promedio deprimidos de  $Fe_d$  y  $Mn_d$  y la presencia de rasgos redox. Los perfiles La Fronterita X y Famaillá presentan las mayores condiciones reductoras en el contexto de suelos estudiados y se asumen con condiciones ácuicas.

**Palabras clave.** Hierro y Manganeso secundarios, Rasgos redoximórficos, Micromorfología.

## HYDROMORPHY AND AQUIIC CONDITIONS IN SOILS OF THE ALLUVIAL PLAIN OF TUCUMÁN (ARGENTINA)

### ABSTRACT

The profiles of four soils with different drainage types were selected in the alluvial plain of Tucumán in order to analyze the intensity of the hydromorphy and detect which of the soils conforms to an aquic conditions. The four types were: La Aguadita (thermic Typic Udipsamment) (well-drained), La Fronterita XI (coarse loamy, illitic, thermic Typic Hapludoll) (moderately well-drained), La Fronterita X (fine loamy, illitic, thermic Aquic Argiudoll) (imperfectly drained), and Famaillá (fine, illitic, thermic Aquic Argiudoll) (imperfectly drained). The soils show endosaturation conditions for six months of the year, with an increase in water level during summer-autumn and a decrease in winter-spring. The degree of reduction was assessed in terms of the distribution of iron and manganese associated with redoximorphic features analyzed on a micromorphological scale. In the well-drained and moderately well-drained profiles,  $Fe_d$  and  $Mn_d$  show little mobility, with the respective values ranging from 0.50-0.80% and 0.03-0.06%,  $Mn_d/Fe_d < 0.08\%$  and underdeveloped redoximorphic features. In the profiles with imperfect drainage, the  $Fe_d$  sometimes co-migrates with and sometimes separates from clay, with the segregation of  $Fe_d$  outside the profile.  $Mn_d$  has low values ( $< 0.01-0.06\%$ ) with an increase of 0.20% in the BC of La Fronterita X,  $Mn_d/Fe_d = 0.33$  and more developed redox features. The analysis suggests that the hydromorphic process increases from the moderately well-drained La Fronterita XI profile towards the imperfectly drained La Fronterita X and Famaillá profiles. The former two profiles are expressed in the  $Mn_d/Fe_d$  ratio and in the increasing size and abundance of redox features as observed on a micromorphological scale; and the Famaillá profile in the low mean value of  $Fe_d$  and  $Mn_d$  and the presence of redoximorphic features. The Fronterita X and Famaillá profiles present the most reduced conditions among the studied soils and are assumed to conform to an aquic regime.

**Key words.** Micromorphology, Redoximorphic features, Secondary Iron and Manganese.

## INTRODUCCIÓN

En la llanura aluvial de la provincia de Tucumán el nivel freático ha tenido una importante influencia en la génesis de los suelos. Su régimen estacional muestra un período de ascenso durante los meses de verano y otoño,

y otro de descenso durante invierno y primavera (Zaccardi & Fadda, 1972; Figueroa *et al.*, 1998). El proceso de hidromorfía se manifiesta en mayor o menor medida, dependiendo fundamentalmente de la posición de los suelos en el relieve y la profundidad del nivel freático. Los

suelos localizados en posición de relieve subnormal o cóncavo con freática próxima a la superficie, presentan rasgos redoximórficos de variable desarrollo dependiendo de la intensidad del proceso. Los situados en posición de relieve normal, donde el drenaje es bueno o moderado y las texturas más gruesas, los rasgos redoximórficos son tenues o inexistentes (Zuccardi & Fadda, 1985).

Moscattelli *et al.* (1998), en la cartografía de semidetalle de esta región, identificaron ocho series de suelos, cinco de las cuales presentan signos de hidromorfía de intensidad y profundidad variables, en suelos moderadamente bien drenados, e imperfectamente drenados. Sin embargo, en el área también se observan suelos con drenaje moderado o imperfecto, en donde el proceso de hidromorfía no se encuentra claramente expresado. Los rasgos redoximórficos son difíciles de visualizar macroscópicamente, en ocasiones se presentan como pequeños moteados de escaso contraste a profundidades variables en el *solum*. El color de la matriz muestra en ellos cromas < 2. Vepraskas & Wilding (1983) y Evans & Franzmeier (1985), han señalado la dificultad que presenta como criterio de identificación de ambiente reductor, colores de bajo cromas (< 2) en suelos periódicamente saturados, debido a que en muchos casos suelen ser heredados del material originario. Es improbable que el bajo cromas hallado en la matriz de los suelos sea consecuencia de una fuerte reducción en todos los casos, porque debería ir acompañado de un empobrecimiento en hierro total, hecho que no se verifica.

El objetivo de este estudio es analizar la intensidad alcanzada por el proceso y considerar cuál de los suelos estudiados cumplen con las condiciones ácuicas definidas en la Soil Taxonomy (2006) donde se tiene en cuenta, la saturación, la intensidad de la reducción y los rasgos redoximórficos asociados.

#### Condiciones de saturación

Figuroa *et al.* (1998) estudian en la llanura aluvial las oscilaciones del nivel freático y su vinculación con las precipitaciones durante un período de monitoreo de 4 años (1972-1982). Encuentran que en la región delimitada por las isohietas entre 1.000 y 1.100 mm de precipitación anual, que es el sector donde se encuentran los suelos estudiados, la profundidad promedio de la freática es de 1,17 m con fluctuaciones promedio entre 1,57 y 1,31 m. Concluyen, que existen dos semestres claramente contrastados: de noviembre a abril, que es el período donde se concentran las lluvias y cuando se manifiesta un sostenido aumento del nivel freático, y un segundo semestre, de mayo a octubre, donde se registran las más bajas precipitaciones del año, con un pronunciado y continuo descenso del nivel freático. A resultados similares llegan Villegas *et al.* (1981) en el Departamento Famaillá.

Estos trabajos permiten afirmar que los suelos estudiados se encuentran bajo condiciones de *endosaturación* durante aproximadamente seis meses al año.

#### MATERIALES Y MÉTODOS

La llanura aluvial de Tucumán se localiza en el centro de la provincia a ambas márgenes del Río Salí. Se extiende desde el sur del departamento Capital hasta el Río Marapa en el departamento Graneros. Su límite occidental lo constituye la base del piedemonte, a unos 400 msnm, y el oriental, el arroyo Muerto-Mixta, en los departamentos de Cruz Alta y Leales. Se distinguen en ella dos subregiones naturales divididas por el Río Salí: la llanura aluvial no salina u occidental y la llanura aluvial salina u oriental. El presente estudio se realiza en la llanura aluvial no salina.

El área se encuentra circunscripta por la llanura tucumana, constituyendo esta última, el límite occidental de la llanura chacopampeana. Limita por el oeste con la Sierra del Aconquija, y hacia el norte por la Sierra de San Javier (Moscattelli *et al.*, 1998). Conforman una extensa planicie, esencialmente chata, con pendientes que no superan el 0,5%. En ella se confunden las líneas de coalescencia de amplios conos de deyección que nacen en las sierras occidentales. Se encuentra formada por un espeso manto de material detrítico depositado por los cursos de agua que bajan de las montañas y derraman sus sedimentos en la llanura, generando formas de divagación fluvial: paleocauces, albardones, meandros abandonados y planos de anegamiento estacional (Sayazo *et al.*, 1984; Zuccardi & Fadda, 1985).

Los materiales originarios de los suelos están constituidos predominantemente por arenas fluviales y aportes eólicos de tipo loessico intimamente mezclados (Moscattelli *et al.*, 1998). El análisis microscópico de la fracción arena revela abundante cuarzo, frecuentes micas y feldespatos, esencialmente, con trizas de vidrio volcánico subordinado. La fracción arcillosa muestra abundante illita con esmectita subordinada. Esta última, generalmente asociada a sectores del relieve más deprimido (*datos no publicados*).

El clima es perhúmedo-cálido en el oeste y subhúmedo húmedo-cálido en el este (Torres Bruchman, 1972). El gradiente de precipitación media anual es de 1.200 mm y 700 mm, respectivamente. La mayor frecuencia de lluvias se registra en el período estival-otoñal, siendo escasas en invierno y primavera. La evapotranspiración potencial de acuerdo a Thornthwaite, es de 900 mm en el oeste, con balance hídrico positivo, y de 900 a 1.000 mm en el este, con una deficiencia hídrica anual moderada del orden de los 200 mm. Ésta es compensada por el aporte del nivel freático, produciendo la saturación de los suelos en amplios sectores de la llanura aluvial (Moscattelli *et al.*, 1998).

La vegetación primitivamente respondía al gradiente de precipitación oeste-este y al relieve (Zuccardi & Fadda, 1972). Un Bosque Subtropical cubría la llanura pedemontana con una vegetación perennifolia de árboles de gran porte, con especies típicas como el Laurel y Horco Molle, y un Bosque de Transición se extendía hacia el este, cubriendo la llanura central, entre las isohietas de 800 y 1.000 mm, representado por árboles de gran tamaño como La Tipa y el Pacará. Esta vegetación primitiva fue paulatinamente reemplazada por la actividad agrícola que se extendió de oeste a este.

En el estudio se seleccionaron cuatro perfiles de suelo con distinta clase de drenaje. Su descripción y muestreo se realizó según el Handbook N° 18 Soil Survey Staff (1993) y se clasificaron de acuerdo al sistema Soil Survey Staff (2006).

Las determinaciones analíticas fueron las siguientes: materia orgánica por el método de Walkley-Black; pH en agua 1: 2,5, método potenciométrico; salinidad: resistencia eléctrica en la pasta; conductividad eléctrica: resistencia en el extracto de saturación; capacidad de intercambio catiónico: método de Bower y fometría de llama; carbonatos: calcímetro de Scheibler; granulometría: Kilmer & Alexander (1949).

La intensidad de la reducción, se analizó de acuerdo a la propuesta de Khan & Fenton (1996) donde se considera la distribución de hierro y manganeso secundarios, en asociación con los rasgos redoximórficos. Los oxihidróxidos cristalinos y paracristalinos de hierro y manganeso se obtuvieron mediante extracción con ditionito-citrato-bicarbonato de acuerdo al método de Mehra & Jackson (1960) (citado por Guillet & Souchier, 1987). Las formas complejadas y amorfas, se obtuvieron por el método de Schwertmann (1964) (citado en Guillet & Souchier, 1987). Este procedimiento emplea la solución *Tamm*, cuyo reactivo combinado de ácido oxálico y oxalato de amonio, disuelve de manera selectiva el conjunto de formas complejadas y amorfas preservando los oxihidróxidos cristalizados. Las mediciones se llevaron a cabo por absorción atómica. En las descripciones micromorfológicas se siguió la metodología propuesta por Bullock *et al.* (1985) y Brewer (1976).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Suelos

Los datos de carácter externo, morfología, datos analíticos y clasificación se presentan en las Tablas 1, 2 y 3.

La Aguadita y La Fronterita XI, ubicados en transición entre la llanura pedemontana y la llanura aluvial presentan clase de drenaje bueno (BD) a moderadamente bueno (MBD). La Fronterita X y Famaillá se encuentran en la llanura aluvial propiamente dicha. El drenaje es imperfecto (ID) consecuencia de un relieve plano a plano-cóncavo y horizontes Bt con arcilla cercana al 30%. El *color* de la matriz es en todos ellos y en cada uno de sus horizontes de 10YR, con HUE que varía de 2 a 4, y cromas < 2, en húmedo. Son suelos bien provistos de materia orgánica, en los horizontes superiores ronda entre 3,5 y 5,0% y disminuye gradualmente, mostrando su incorporación en el perfil, hasta una profundidad de 60-70 cm, donde alcanza el 1-2%. Una excepción constituye el perfil La Aguadita, donde no alcanza el 1% en ningún horizonte. El *pH* muestra que son suelos en general muy débilmente ácidos (6,1-6,8 pH), con horizontes muy ligeramente alcalinos por debajo de los 50 cm para los perfiles La Fronterita X y Famaillá, de drenaje imperfecto.

### Intensidad de reducción. Distribución de hierro y manganeso secundarios

El hierro extraído a base de ditionito-citrato-bicarbonato (DCB) incluye las formas cristalina, amorfa y complejada con la materia orgánica ( $Fe_d$ ) (Tabla 4). Su valor promedio, tomado en la porción homogénea de los perfiles, disminuye a medida que el drenaje natural empeora: La Aguadita (BD),  $Fe_d = 0,80$ ; La Fronterita XI (MBD),  $Fe_d = 0,72$  y Famaillá (ID),  $Fe_d = 0,57$ . La Fronterita X, a pesar de poseer drenaje imperfecto, muestra un valor de  $Fe_d = 0,74$ , cercano al de La Fronterita XI.

La distribución de  $Fe_d$  en profundidad (Fig. 1), también varía de acuerdo a la clase de drenaje. En el perfil La Aguadita (BD) situado en la llanura de transición, se observa una marcada disminución de  $Fe_d$  desde el horizonte C al AC (30-50 cm), para luego aumentar en Ap. Esto está acompañado por un aumento de arcilla de AC a Ap, lo cual indicaría que el  $Fe_d$  se encuentra unido a ella aunque sin verificarse migración. En el perfil La Fronterita XI (MBD), se observa en la porción homogénea del perfil (Ap-AC), una disminución de  $Fe_d$  desde su base hasta la superficie, con un mínimo en Ap2. Mientras que el porcentaje de arcilla muestra un continuo aumento desde la base del *solum* hacia el horizonte superficial. Esta diferente distribución, sugiere que el movimiento de  $Fe_d$  es independiente al de la arcilla y que por lo tanto, existiría una segregación de  $Fe_d$  fuera del perfil. En ambos perfiles, La Aguadita y La Fronterita XI, se registra un aumento de  $Fe_d$  en superficie, seguramente como consecuencia de su complejación con la materia orgánica.

Entre los suelos con drenaje imperfecto se presenta una disímil distribución de  $Fe_d$ . En La Fronterita X, el  $Fe_d$  muestra un aumento en el horizonte Bt, acompañado de un correlativo aumento en el tenor de arcilla. Esto sugiere una migración conjunta desde Ap hacia el horizonte Bt. Mientras que, en el perfil Famaillá se observa un significativo aumento de arcilla en el Bt, pero que no se corresponde con un aumento de  $Fe_d$ , que se mantiene con un tenor casi constante (0,55-0,58). Esto sugiere una separación de  $Fe_d$  de la fracción arcillosa y una migración diferencial de estos constituyentes en el perfil.

Estas características en la distribución de  $Fe_d$  fueron también observadas por Blume & Schwertman (1969) en suelos con hidromorfía de distinta intensidad. Estos autores encontraron que en suelos bien drenados la relación  $Fe_d$ /arcilla permanece casi constante a lo largo del perfil, mientras que en suelos con drenaje impedido (pseudogley) la relación  $Fe_d$ /arcilla muestra en ocasiones un mínimo hacia la superficie, causada por una remoción lateral de Fe en solución (independiente del movimiento de la arcilla). Mientras que en otras, suele observarse un fuerte máximo de  $Fe_d$ /arcilla en horizontes subsuper-

Tabla 1. Datos generales y de carácter externo de los suelos.  
Table 1. General data and external characteristics of the soils.

Perfil	La Aguadita	La Fronterita XI	La Fronterita X	Famailá
Clasificación taxonómica	Udipsamment típico, mixto térmico	Hapludol típico, franco grueso, mixto, térmico	Argiudol Ácuico, franco fino, mixto, térmico	Argiudol Ácuico, fino illítico, térmico
Ubicación	A la vera del camino desde el Ingenio Fronterita, 4 km hacia el oeste	1.000 m al noroeste del Ingenio Fronterita	200 m, en dirección sudoeste, de la intersección de la Ruta prov. 334 con las vías del FFCC Gral Belgrano	A la vera de la Ruta Nac. 38, km 271. 300 m en dirección noroeste
Coordenadas aprox. ( $\pm 5''$ )*	Lat.: 27° 00' 52'' Long.: 65° 27' 56''	Lat.: 27° 01' 40'' Long.: 65° 27' 50''	Lat.: 27° 02' 30'' Long.: 65° 26' 55''	Lat.: 27° 05' 56'' Long.: 65° 25' 38''
Altura aprox. (msnm)*	417	403	367	356
Paisaje	Planicie suavemente ondulada. Transición entre llanura pedemontana y llanura aluvial ppd	Planicie suavemente ondulada. Transición entre llanura pedemontana y llanura aluvial ppd	Planicie aluvial suavemente ondulada	Planicie aluvial suavemente ondulada
Cultivo	Caña de azucar	Caña de azucar	Caña de azucar	Caña de azucar
Material originario	Aluvional	Aluvional	Aluvional	Aluvional
Relieve	Normal a excesivo	Normal	Normal	Subnormal
Pendiente	1-3 %	0-1 %	0-1 %	0-1 %
Escurrimiento	Medio a rápido	Medio	Lento	Lento
Permeabilidad	Moderada a moderadamente rápida	Moderada	Moderadamente lenta	Moderadamente lenta
Nivel freático**	1,17 m promedio, (fluctuante de 1,57 a 1,31 m)	1,17 m promedio, (fluctuante de 1,57 a 1,31 m)	1,17 m promedio, (fluctuante de 1,57 a 1,31 m)	1,17 m promedio, (fluctuante de 1,57 a 1,31 m)
Clase de drenaje	Bien drenado	Moderadamente bien drenado	Imperfectamente drenado	Imperfectamente drenado
Distribución de humedad	Uniforme, húmedo	Uniforme, húmedo	Uniforme, fresco	Uniforme, húmedo
Erosión	No visible	No visible	No visible	No visible
Salinidad	No salino	No salino	No salino	No salino
Alcalinidad	No alcalino	No alcalino	No alcalino	No alcalino

\* Carta IGM: Famailá 2766-23-1 \*\*Figueroa *et al.* (1998)

Tabla 2. Características morfológicas de los suelos.  
Table 2. Morphological characteristics of the soils.

Horizonte	Prof. (cm)	Color **	Textura	Estructura	Consistencia				Barnices	Moteados	Límite ***
					Plas	Adh.	H	S			
La Aguadita (Udipsamment típico, mixto, térmico)											
Ap	0-20	10YR 2/2	Fr Ar	A4 fi de	0	0	1	1	-	-	g
AC	20-46	10YR 2/2	Fr Ar	A4 me de	0	0	2	1	-	-	g
C	46-100	10YR 2/1	Fr Ar	M	0	0	0	0	-	-	
La Fronterita XI (Hapludol Típico, franco grueso, mixto, térmico)											
Ap1	0-20	10YR 2/1	Fr Li	A4 me mo	1	0	2	2	-		g
Ap2	20-37	10YR 3/2	Fr Li	A4 me mo	0	0	2	2	-	d e f	gq
AC	37-72	10YR 2/2	Fr Li	A4 me de	1	1	2	1	-	d e f	g
2C	72-130	10YR 3/2	Fr Ar	M	0	0	1	1	-	d e f	
La Fronterita X (Argiudol Ácuico, franco fino, mixto, térmico)											
Ap	0-14	10YR 3/2	Fr Li	A4 me/fi	1	1	2	2	-	d e f	g
Bt*	14-35	10YR 4/2	Fr Arc Li	A5 gr fu	3	3	3	2	-	d e f	g
BC	35-62	10YR 3/2	Fr Li	A4 fi de	1	1	2	2	-	d c f	g
2C	62-120	10YR 3/2	Fr	M	1	1	2	2	-	d e f	
Famaillá (Argiudol Ácuico, fino, illítico, térmico)											
Ap	0-20	10YR 3/2	Fr Arc Li	A4 me mo	1	1	3	2	-	-	g
Bt*	20-55	10YR /2/5	Fr Arc Li	A6 me mo	2	2	4	2/3	Cl hm + f	d e f	g
2C	55-110	10YR 3/2	Fr Li	M	1	1	2	2		p c f	

Las abreviaturas corresponden a las normas de reconocimiento de suelos del INTA y al Handbook N°18, Soil Survey Staff (1993). \* Bt determinado por micromorfología \*\*. Los colores son Munsell en húmedo. \*\*\* g: gradual, q: quebrado.

ficiales, indicando una adición lateral de Fe que corresponde a una degradación de Fe de perfiles vecinos.

Richardson & Hole (1979) por su parte, en estudios de hidrosecuencias, interpretan que a medida que disminuye el drenaje, el Fe es menos cristalino, más móvil, y se moviliza desde la fracción arcillosa hacia la arenosa para formar concreciones. Afirman que en suelos bien drenados, el Fe permanece junto a la arcilla y es más cristalino.

La extracción realizada a base de ácido oxálico incluye las formas de Fe complejadas y amorfas ( $Fe_o$ ). Los resultados obtenidos sólo fueron consistentes para los perfiles La Fronterita X y Famaillá (Tabla 4 y Fig. 1). Las mediciones realizadas en los perfiles La Aguadita y La Fronterita XI no han sido consideradas por carecer los resultados de reproducibilidad. No obstante, los resultados obtenidos en los dos primeros perfiles, permitiría establecer que la distribución de  $Fe_o$  en profundidad en estos suelos alcanza en varios horizontes un elevado porcentaje respecto al total de óxidos libres extraídos, incluidos en  $Fe_d$ . Según Blume & Schwertmann (1969), esto indica bajo grado de cristalización (aging) e interpre-

tan, que sería consecuencia del escaso tiempo transcurrido desde la precipitación del óxido y/o a la intervención de materia orgánica, que al acomplejar el Fe, inhibe el crecimiento cristalino. Además, los autores mencionados señalan que otro factor importante para una pobre cristalización, es un pH muy bajo ( $< 5$ ) que impide la precipitación a  $Fe^{+3}$ . Dado que en los suelos estudiados, el pH no es en ningún caso inferior a 6,1, la influencia de la materia orgánica, que es incorporada en profundidad en estos suelos, sería la responsable de la alta tasa de  $Fe_o$ .

La movilidad del  $Mn_d$  se presenta distinta a la del  $Fe_d$ . En primer lugar, existe una diferencia entre los suelos bien drenados a moderadamente bien drenados de La Aguadita y La Fronterita XI, y aquellos imperfectamente drenados de La Fronterita X y Famaillá (Tabla 4). No obstante presentar todos ellos tenores deprimidos en  $Mn_d$ , oscilantes entre  $< 0,01$  y  $0,06$ , los primeros muestran valores más o menos constantes, que decrecen levemente en profundidad ( $0,06-0,03$ ). Mientras que en los segundos, con drenaje imperfecto, se encuentran los valores extremos, con un mínimo  $< 0,01$  y un máximo de  $0,20$ . Este último, correspondiente al horizonte BC de La Fronterita X (35-

Tabla 3. Datos analíticos.  
Table 3. Analytical data.

Perfil	La Aguadita				La Fronterita XI				La Fronterita X				Famailá	
	Ap	AC	C	Ap1	Ap2	AC	2C	Ap	Bt	BC	2C	Ap	Bt	2C
Horizonte	0-20	20-46	46-120	0-20	20-37	37-72	72-130	0-14	14-35	35-62	62-120	0-20	20-55	55-110
Profundidad (cm)	0,20	0,56	0,31	2,99	2,00	1,12	0,29	2,59	0,92	0,64	0,19	2,03	0,64	0,32
Carbono orgánico %	0,34	0,97	0,53	5,15	3,45	1,93	0,50	4,47	1,59	1,10	0,33	3,50	1,10	0,55
Materia orgánica %	5,38	3,85	2,23	18,09	17,06	11,21	6,75	20,60	31,35	24,67	18,40	29,05	36,13	20,08
Arcilla % (< 2 mm)	35,39	28,49	24,09	55,56	57,67	54,84	47,61	64,82	55,72	52,52	48,83	61,07	56,37	51,43
Limo % (2-50 mm)	59,23	67,66	73,68	26,35	25,27	33,95	45,64	14,58	12,93	22,81	32,77	9,88	7,50	28,49
Arena total %	14,41	15,00	14,27	7,78	9,35	15,36	22,12	5,40	4,64	7,46	11,17	3,83	3,18	14,73
Arena muy fina %	27,53	30,84	32,89	8,20	8,40	11,84	20,09	7,10	5,59	9,44	14,45	4,58	2,86	10,69
Arena fina %	10,55	14,20	14,78	3,47	2,42	1,97	1,32	0,85	1,37	2,59	3,79	0,53	0,32	1,14
Arena media %	4,18	5,31	6,78	3,05	1,89	1,35	0,71	0,64	0,74	1,56	1,95	0,32	0,21	0,73
Arena gruesa %	2,56	2,31	4,96	3,85	3,21	3,43	1,40	0,59	0,59	1,76	1,41	0,62	0,93	1,20
Arena muy gruesa %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,97
CO <sub>3</sub> Ca %	5,500/0	6,000/0	8,000/0	2,000/0	2,800/0	3,800/0	3,800/0	1,100/0	700/0	850/0	1,000/0	1,400/0	650/0	800/0
Resist. en la pasta (Ohms/cm)	6,8	6,8	6,7	6,4	6,7	6,5	6,3	6,4	7,0	7,2	7,2	6,1	6,7	7,3
pH en H <sub>2</sub> O (1:2,5)	7,21	5,41	4,13	15,58	13,36	7,31	5,09	16,54	16,01	11,66	8,37	14,73	19,50	16,96
Cationes de cambio (cmol kg <sup>-1</sup> )	0,32	1,80	1,48	2,33	1,80	3,92	1,91	3,50	4,77	4,56	3,07	3,71	5,99	3,60
Ca <sup>++</sup>	0,24	0,23	0,22	0,28	0,25	0,26	0,25	0,37	0,45	0,48	0,44	0,32	0,48	0,44
Mg <sup>++</sup>	0,42	0,23	0,21	1,96	1,00	0,36	0,28	2,53	1,54	0,92	0,84	1,34	1,34	0,84
Na <sup>+</sup>	1,50	2,20	3,10	1,10	1,0	1,40	2,40	1,30	1,70	2,20	3,10	1,20	1,30	2,10
K <sup>+</sup>	8,19	7,67	6,04	20,15	16,41	11,85	7,53	22,94	22,77	17,62	12,72	20,1	27,31	21,84
% Sodio intercambiable	15,22	10,33	7,01	25,01	22,83	17,94	10,33	27,18	26,36	20,93	14,13	26,09	35,87	20,93
Valor S (cmol kg <sup>-1</sup> )	53,81	74,20	86,10	80,50	71,80	66,00	72,80	84,40	86,33	84,14	90,50	77,04	76,13	100
Valor T (cmol kg <sup>-1</sup> )														
Saturación en bases % (S/T)														

Tabla 4. Características físico-químicas seleccionadas de los suelos. BD, MBD e ID: suelos bien drenados, moderadamente bien drenados e imperfectamente drenados; Fe<sub>p</sub>, Fe<sub>dp</sub>, Mn<sub>d</sub> y Mn<sub>op</sub>, Fe<sub>o</sub> óxidos libres extraídos mediante ditionito-citrato-bicarbonato (DCB) (d) y ácido oxálico (o), Fe<sub>d</sub> hierro promedio en solium; Rasgos redoximórficos. M= moteados; N=nódulos; C=cutanes; T= típicos, (d)= débiles; (f)= finos, (c)= comunes, (e)= escasos; (me)= muy escasos.

Table 4. Selected physico and chemical characteristics of the soils. BD, MBD and ID: well drained, moderate well drained and imperfectly drained soils; Fe<sub>p</sub>, Fe<sub>dp</sub>, Mn<sub>d</sub> y Mn<sub>op</sub>, Fe<sub>o</sub> free oxides extracted with dithionite-citrate-bicarbonate (DCB)(d) and oxalic acid (o), Fe<sub>d</sub> average iron in solium; redoximorphic features: M= mottles; N= nodules; C= cutanes; T= típicos, (d) weak, (f) thin, (c)= common, (e)= few, (me)= very few

Hte	Prof (cm)	Color	MO (%)	pH	Arcilla (%)	Fe <sub>t</sub> (%)	DCB (%)			Oxalato (%)			Índice Mn <sub>o</sub> /Fe <sub>d</sub>	Rasgos Redoximórficos
							Fe <sub>d</sub>	Mn <sub>d</sub>	'Fe <sub>d</sub>	Fe <sub>o</sub>	Fe <sub>o</sub>	Mn <sub>o</sub>		
<b>La Aguadita</b> (Bien drenado)														
Ap	0-20	10YR 2/2	0,34	6,8	5	4,45	0,92	0,06	-	-	-	0,07	-	
AC	20-46	10YR 2/2	0,97	6,8	4	4,68	0,66	0,03	0,80	-	-	0,05	-	
C	46-100	10YR 2/1	0,53	6,7	2	4,42	0,81	0,04	-	-	-	0,05	-	
<b>La Fronterita XI</b> (Moderadamente bien drenado)														
Ap1	0-20	10YR 2/1	5,15	6,4	18	4,78	0,73	0,05	-	-	-	0,07	-	
Ap2	20-37	10YR 3/2	3,45	6,7	17	5,38	0,53	0,04	0,72	-	-	0,08	M (def)	Organoarg (me) (100-200µm), fuerte tinsión de la matriz por pigmento orgánico
AC	37-72	10YR 2/2	1,93	6,5	11	4,96	0,91	0,03	-	-	-	0,03	M (def)	Halos nodulares y segregaciones de Fe-Mn (c) (100-200 y 20-30µm) (valores extremos de 1mm)
2C	72-130	10YR 3/2	0,50	6,3	7	5,69	0,25	0,01	-	-	-	0,04	M (def)	C (me) (f), de granos inmersos.
<b>La Fronterita X</b> (Imperfectamente drenado)														
Ap	0-14	10YR 3/2	4,47	6,4	21	3,57	0,74	0,06	0,70	0,06	0,08	0,08	M (def)	NT de bordes netos y difusos (e) de Fe-Mn y pig org (1-3 mm), C intranodulares (e) (100-500 µ), impregnación general de la matriz por óxidos de Fe-Mn y pigmento orgánico
Bt	14-35	10YR 4/2	1,59	7,0	31	4,75	0,89	0,01	0,74	0,70	0,04	0,01	M (def)	NT (f) de bordes difusos de Fe-Mn que gradan a impregnaciones en matriz, NT de bordes netos de Fe-Mn (400-500 mm) con C intranodulares (f); C (ferriarg., organoarg.) (50-100 µm, (f) y 1-2 mm (e), C compuestos de ar y li, hipo y cuasicut de Fe-Mn y pig. org. que gradan a impregnaciones en matriz Idem anterior
BC	35-62	10YR 3/2	1,10	7,2	25	4,92	0,59	0,20	0,15	0,01	0,33	0,04	M (def)	Impregnación gral de Fe-Mn en matriz
2C	62-120	10YR 3/2	0,33	7,2	18	4,80	0,25	0,01	0,20	0,01	0,04	0,04	M (def)	
<b>Famailiá</b> (Imperfectamente drenado)														
Ap	0-20	10YR 3/2	3,50	6,1	29	5,08	0,58	<0,01	0,50	0,01	0,02	0,02	-	NT de Fe de bordes difusos que gradan a halos nodulares (e) (100 µm), segregaciones de Fe (me) (2-3 mm), CT (me), hipo y cuasicut (me)
Bt	20-55	10YR 3/2,5	1,10	6,7	36	5,46	0,55	0,02	0,57	0,13	0,03	0,04	M (def) C (ef)	NT de Fe (200 µm) de bordes difusos, segregaciones de Fe (e) (300 µm), C ar impura (c) (20-30 µm), C limosos (me) (20-30 µm).
2C	55-110	10YR 3/2	0,55	7,3	20	5,16	0,81	0,03	0,12	0,03	0,04	0,04	M (pcf)	NT de bordes difusos (e) de Fe-Mn (300 µ), segr de Fe-Mn (c), C ar impura (e), (20-50 µm)

62 cm). También se observa que los máximos valores de  $Fe_d$  registrados en AC de La Fronterita XI (37-62 cm) y Bt de la Fronterita X (14-35 cm), no se corresponden con un máximo de  $Mn_d$ , mostrando que éste ha tenido una movilidad distinta a la del  $Fe_d$ . El  $Mn_d$  presenta un máximo en el perfil La Fronterita X a 35-62 cm de profundidad, por debajo del máximo de  $Fe_d$  registrado, producto de su mayor movilidad natural. Similares características han sido descritas por Blume & Schwartzmann (1969), Mc. Daniel *et al.* (1992) y Khan & Fenton (1996) para suelos con condiciones ácuicas.

La Figura 1, también muestra que la movilidad del  $Mn_d$  ha sido independiente de la arcilla. Mc Daniels *et al.* (1992) explican que el manganeso, una vez que es liberado por meteorización de los minerales primarios, se redistribuye en forma independiente de la arcilla y óxidos de hierro. Dada su mayor movilidad respecto al hierro, sufre una mayor redistribución en el paisaje para un mismo pH y Eh. Por lo tanto, concluyen, que puede ser utilizado como trazador pedoquímico de procesos hidrológicos superficiales.

Khan & Fenton (1996) plantean la hipótesis que es posible utilizar el  $Mn_d$  y  $Fe_d$  como indicadores de ambiente reductor u oxidante, y que, junto a la relación  $Mn_d/Fe_d$ , permite distinguir condiciones ácuicas, cuando se analiza su distribución, asociada a la saturación y a los rasgos redoximórficos.

### Rasgos redoximórficos

La Figura 2, tomada parcialmente de Khan & Fenton (1996) y adaptada a los suelos estudiados, muestra la profundidad promedio teórica del nivel freático y sus oscilaciones (Figueroa *et al.*, 1998), y la relación  $Mn_d/Fe_d$  en profundidad en cada perfil. La asociación con los rasgos redoximórficos muestra lo siguiente (Tabla 4):

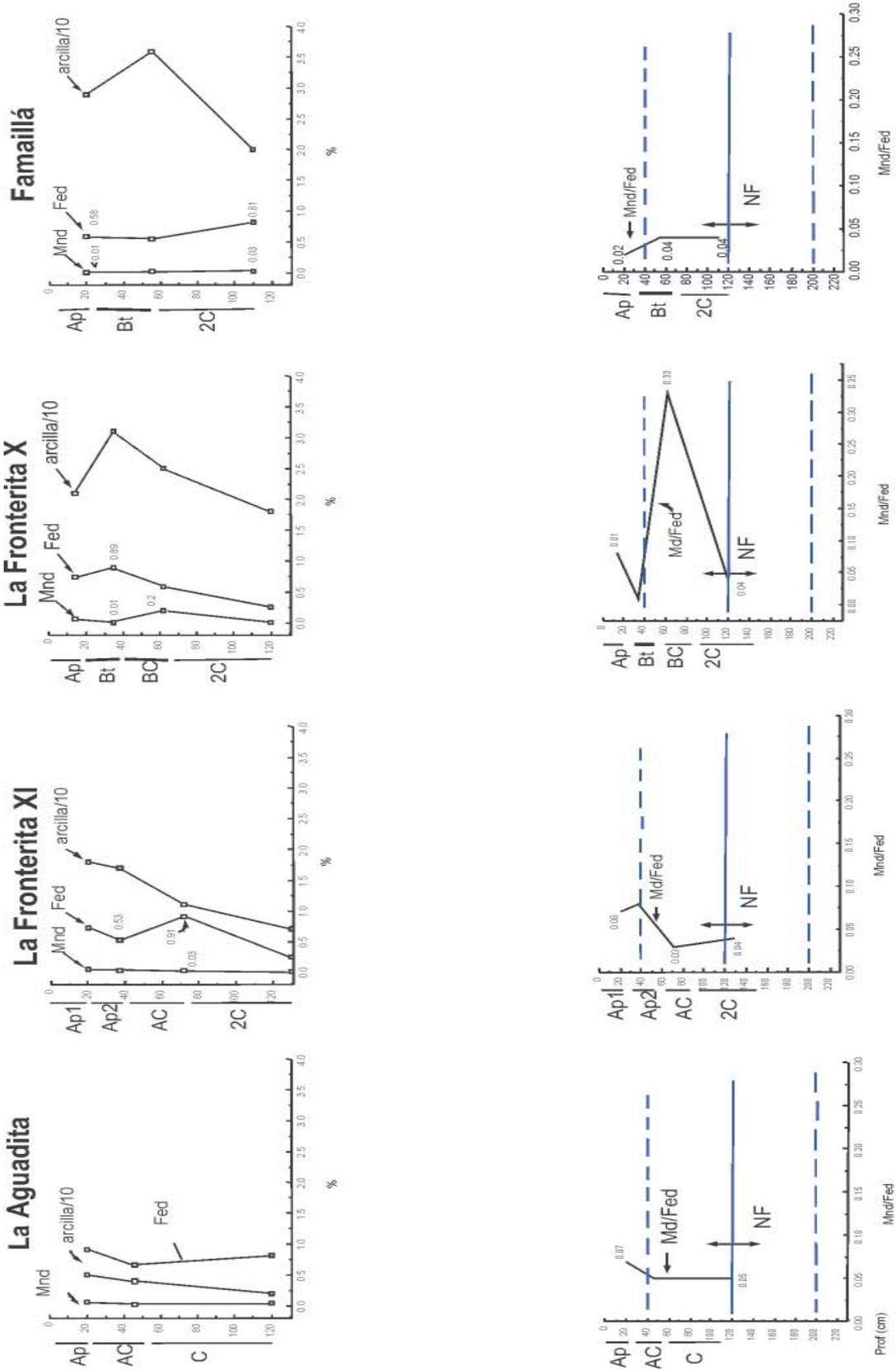
a) *La Aguadita* (BD): la distribución  $Mn_d/Fe_d$  es casi constante, con valores entre 0,05 y 0,07. No se observan rasgos redoximórficos a nivel macro ni micromorfológicos.

b) *La Fronterita XI* (MBD): presenta valores de  $Mn_d/Fe_d$  entre 0,03 y 0,08. Este último, constituye un máximo entre los 20 y 37 cm, en el horizonte Ap2. Los rasgos redoximórficos se observan desde los 20 cm hasta la base del perfil. Macroscópicamente se distinguen en moteados débiles, finos y escasos. La micromorfología muestra en **Ap2 (20-37 cm)** muy escasos organoargilanes (Brewer, 1976), de 100 a 200  $\mu m$  y otros de 20 a 30  $\mu m$  comunes. En **AC (37-72 cm)** son comunes los halos nodulares y segregaciones irregulares de hierro y manganeso de 100 a 200  $\mu m$  de diámetro promedio y valores extremos de 1 mm difundidos en la matriz. En **2C (72-130 cm)** muy escasos cutanes, muy finos, de granos inmersos (Figs. 3 y 4).

c) *La Fronterita X* (ID): el índice  $Mn_d/Fe_d$  presenta valores entre 0,01 y 0,33. Este último, que constituye un máximo, se presenta entre 35 y 62 cm de profundidad. Los rasgos redoximórficos se manifiestan en todo el perfil. Microscópicamente, se observan moteados débiles, finos, de escasos a comunes, que no se diferencian de un horizonte a otro en contraste o tamaño. La micromorfología revela en el horizonte **Ap (0-14 cm)** escasos nódulos típicos de bordes difusos de hierro y manganeso y pigmento orgánico, de 1-3 mm en promedio, otros, escasos, de bordes netos y una impregnación general de la matriz pardo oscura. Algunos muestran ocasionales cutanes intranodulares. En **Bt y BC (14-62 cm)** se observan frecuentes nódulos típicos de bordes difusos de hierro y manganeso que gradan a impregnaciones irregulares en la matriz, escasos nódulos típicos de bordes netos de hierro y manganeso de 400 a 500  $\mu m$  de diámetro promedio, con frecuentes cutanes intranodulares (ferriargilanes, ferriorganomanganeso). Frecuentes cutanes simples y compuestos (ferriargilanes y organoargilanes de iluviación) de 50 a 100  $\mu m$ , escasos de 1 a 2 mm. Escasos cutanes compuestos de arcilla y limo, de bordes difusos. Frecuentes hipo y cuasicutanes de 20 a 50  $\mu m$  de espesor promedio de hierro y manganeso y materia orgánica, que gradan a impregnaciones difundidas en la matriz. Es importante destacar que en esta porción del perfil, entre los 14 y 62 cm de profundidad, es donde se observan a escala micromorfológica, la mayor proporción de rasgos pedológicos: tanto redoximórficos (nódulos y segregaciones) como texturales (cutanes, hipo y cuasicutanes) y en cuya porción inferior se registra el máximo índice  $Mn_d/Fe_d$  con 0,33, y valores de  $Fe_d= 0,59$  y  $Mn_d= 0,20$ . En **2C (62-120 cm)** no se observan nódulos de Fe y Mn, sino una impregnación general de óxidos en la matriz. Muy escasos cutanes (ferriargilanes) en poros y masa basal. (Figs. 5 y 6).

d) *Famaillá*: imperfectamente drenado (ID), presenta un índice de  $Mn_d/Fe_d$  de 0,02 y 0,04 para la porción superior e inferior del perfil. Macroscópicamente se observan moteados débiles, escasos y finos desde los 20 cm hasta su base. La micromorfología revela en el horizonte **Ap (0-20 cm)**: escasos nódulos típicos de óxido de hierro de bordes difusos a muy difusos que gradan a halos nodulares de 100  $\mu m$  de diámetro promedio. Segregaciones de óxidos de hierro muy escasas, de 2 a 3 mm de diámetro promedio, difundidas en la matriz.

Muy escasos cutanes típicos, finos (30-50 mm), simples. Muy escasos hipo y cuasicutanes. En **Bt (20-55 cm)** Escasos nódulos típicos ferruginosos, de 200  $\mu m$  de diámetro y bordes difusos, formados por difusión. Segregaciones de óxidos de hierro, escasas, irregulares, de 300  $\mu m$  de diámetro, impregnan la matriz. Cutanes de arcilla



CI. SUELO (ARGENTINA) 28(1): 79-90, 2010

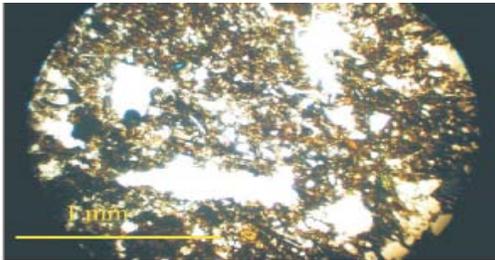


Figura 3. La Fronterita XI. Hzte Ap2. Fuerte tinsión de la matriz por óxidos de hierro, manganeso y pigmento orgánico. Figure 3. La Fronterita XI. Hzte Ap2. Strong staining of the matrix with iron, manganese oxides and organic pigment.

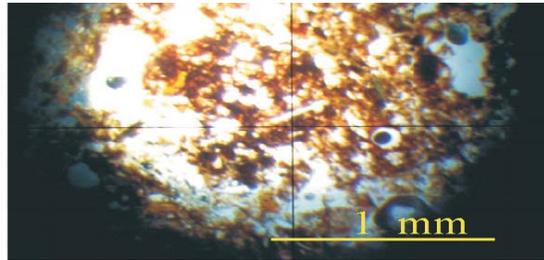


Figura 4. La Fronterita XI. Hzte AC. Impregnaciones de hierro y m anganeso difundidas en la matriz. La fábrica interna, similar a ésta, indica formación *in situ*. Figure 4. La Fronterita XI. Hzte AC. Iron and manganese impregnations difunded in the matrix. The internal fabric, similar of the last, indicates *in situ* formation.

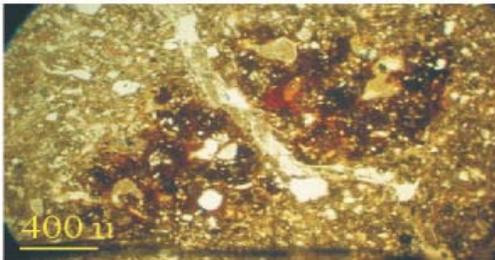


Figura 5. La Fronterita X. Hzte Bt. Impregación irregular de óxidos de hierro y manganeso, atravesada por un canal. Figure 5. La Fronterita X. Hzte Bt. Irregular impregnation of iron and manganese oxides, crossed by a channel.

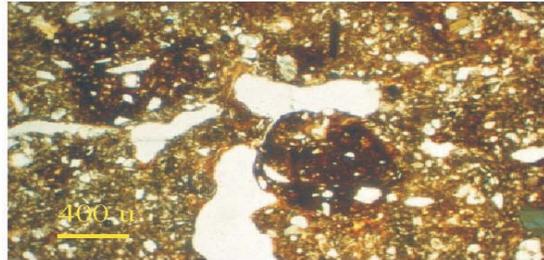


Figura 6. La Fronterita X. Hzte Bt. En el centro: nódulo típico de hierro y manganeso con bordes netos. Arriba a la izquierda: impregnación irregular de la misma composición. Figure 6. La Fronterita X. Hzte Bt. In the centre: tipic nodule of iron and manganese with neat borders. Up and left side: irregular impregnation of the same composition.

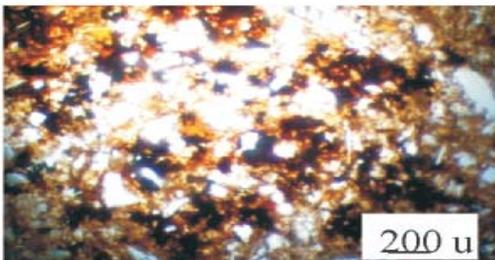


Figura 7. Famaillá. Hzte Ap. Concreciones de óxidos de hierro, manganeso y pigmento orgánico. Nicoles paralelos. Figure 7. Iron and manganese oxides and organic pigment concretions. Parallel nicols.

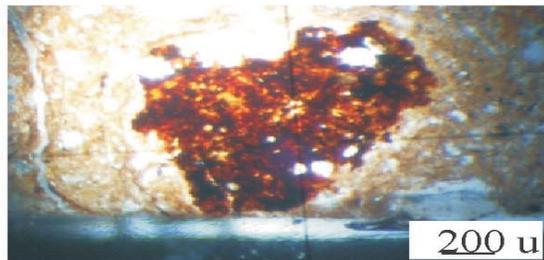


Figura 8. Famaillá. Hzte 2C. Concreción irregular de óxido de hierro y manganeso. Nicoles paralelos y luz convergente. Figure 8. Famaillá. Hzte 2C. Irregular concretion of iron and manganese oxides. Parallel nicols and convergent light.

impura, comunes de 20 a 30  $\mu\text{m}$ , simples. Muy escasos cutanes limosos, de 20 a 30  $\mu\text{m}$ , bordes difusos, simples. En 2C (55-110 cm), escasos nódulos típicos de hierro y manganeso, de 300  $\mu\text{m}$  de diámetro, difusos, irregulares, muy oscuros a negros. Segregaciones de hierro y manganeso comunes, impregnando la matriz. Muy escasos cutanes de arcilla impura, finos (10-50  $\mu\text{m}$ ), de bordes difusos (Figs. 7 y 8).

## CONCLUSIONES

– El tenor casi constante y deprimido de la relación  $\text{Mn}_d/\text{Fe}_d$  en La Aguadita obedece a un buen drenaje natural. El perfil no muestra rasgos redox, el ambiente es oxidante. En estas condiciones es imposible la migración de hierro y manganeso.

– En el perfil La Fronterita XI el pequeño máximo de 0,08 de  $\text{Mn}_d/\text{Fe}_d$  se acompaña de una tinción general de la matriz, con segregaciones irregulares de hierro y manganeso y halos nodulares que se extienden desde el horizonte Ap hacia AC, pero sin la presencia de nódulos típicos. Por debajo de AC, no se observan rasgos redox, solamente una leve tinción general de la matriz.

– El perfil La Fronterita X acusa el más elevado índice  $\text{Mn}_d/\text{Fe}_d$  de los perfiles estudiados con 0,33 en el horizonte BC (35-62 cm). Allí se observa la máxima expresión en rasgos redoximorfos (nódulos típicos, halos nodulares que gradan a segregaciones irregulares en la matriz, entre otros) que sólo ocurre cuando existe un ambiente reductor lo suficientemente intenso para movilizar hierro y manganeso, y ser luego depositados en una fase oxidante. Por debajo de esa profundidad, no se aprecian rasgos redox, solamente una tinción general de la matriz. Esto sugiere un ambiente oxidante para un suelo bien drenado, como es La Aguadita, y otro reductor, con drenaje imperfecto como es La Fronterita X. El perfil La Fronterita XI puede interpretarse de una condición intermedia, donde no se alcanzaría un ambiente reductor suficiente para formar nódulos o concreciones.

El perfil Famaillá constituye una excepción, ya que no muestra índice  $\text{Mn}_d/\text{Fe}_d$  elevado. En este caso, la presencia de nódulos típicos, que aunque escasos se manifiestan en todo el perfil, sería consecuencia de una más intensa reducción como lo muestra el tenor deprimido de  $\text{Fe}_d$  y  $\text{Mn}_d$ . Esto produciría la eliminación del  $\text{Mn}^{+2}$  fuera del perfil, no así, sin embargo, del  $\text{Fe}^{+2}$ , cuya menor movilidad concluiría en la formación de nódulos en la zona de oscilación de la freática.

De acuerdo con este análisis, es razonable inferir entonces, que la intensidad del proceso de hidromorfía aumenta desde el perfil La Fronterita XI con drenaje

moderadamente bueno, a los perfiles La Fronterita X y Famaillá, con drenaje imperfecto. En los dos primeros se expresa en el índice  $\text{Mn}_d/\text{Fe}_d$  y en el aumento de rasgos redox que se observan micromorfológicamente en tamaño y abundancia. Mientras que en el perfil Famaillá, en los valores promedio deprimidos de  $\text{Fe}_d$  y  $\text{Mn}_d$  y en la presencia de rasgos redox.

Los perfiles La Fronterita X y Famaillá presentan las mayores condiciones reductoras en el contexto de suelos estudiados y se asumen con condiciones ácuicas.

## AGRADECIMIENTOS

Mi reconocimiento al Ing. Guillermo Fadda por sus opiniones y sugerencias. Al Ing. Cáceres por los análisis de laboratorio. Al Ing. Sanzano por su colaboración en los trabajos de campo. A los integrantes de la Cátedra de Edafología de la Facultad de Agronomía y Zootecnia de la UNT por su predisposición en mis consultas. Al Dr. Pérez Rodríguez por sus enseñanzas en la extracción y medición de óxidos libres, al personal del Centro de Estudios de Materiales de Sevilla por su colaboración y opinión en los análisis químicos. Al Dr. Viola por la compaginación del material fotográfico y la lectura final del manuscrito.

## REFERENCIAS

- Brewer, R. 1976. Fabric and Mineral Analysis of Soils. John Wiley & Sons, New York, 482 pp.
- Blume, HP & U Schwertmann. 1969. Genetic Evaluation of Profile Distribution of Aluminium, Iron and Manganese Oxides. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 33: 438-444.
- Bullock, PN; A Federoff; A Jongerijs; G Stoops; T Tursina & U Babel. 1985. Handbook for Soil Thin Section Description. Wain Research Publisher. Wolverhampton, England. 152 pp.
- Evans, CV & DP Franzmeier. 1986. Saturation, aeration and color patterns in a toposequence of soils in north-central Indiana. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 975-980.
- Figuerola, LR; Medina, LF & A Pietroboni. 1998. Variaciones del nivel freático en la llanura deprimida de Tucumán. INTA-CRTS. Serie Mon. N° 3. Tucumán. 20 pp.
- Guillet, B & B Souchier, 1987. Los oxihidróxidos amorfos y cristalinos en los suelos (Hierro, aluminio, manganeso, sílice) Pp 17-38. En: M Bonneau & B Souchier. (eds.) Edafología. 2. Constituyentes y propiedades del suelo. Masson. Barcelona. 461 pp.
- Khan, FA & TE Fenton. 1996. Secondary iron and manganese distributions and aquic conditions in a mollisol catena of Central Iowa. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 546-551.
- Kilmer VJ & LT Alexander. 1949. Methods of making mechanical analysis of soils. *Soil Sci.* 68: 15-24.
- Mc Daniel, PA; GR Bathke; SW Boul; DK, Cassel; & AL Falen. 1992. Secondary Manganese/Iron Ratios as Pedochemical Indicators of field - Scale Throughflow Water Movement. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1211-1217.

- Mehra, OP & ML Jackson. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by dihydroxide-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals* 7: 317-327.
- Moscatelli, G; Salazar Plaza, J; Godagnone, R; Cuenca, MA; Nakama, V & Caceres, M. 1998. Estudio para la Reconversión del Sector Agropecuario de la Provincia de Tucumán. CIRN-INTA. Bs. As. 221 pp.
- Richardson, JL & FD Hole. 1979. Mottling and Iron distribution in a Glossoboralf-Haplaquoll Hydrosequence on a Glacial Moraine in Northwestern Wisconsin. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43: 552-558.
- Sayago, JM; L Ratto & M Collantes. 1984. Cap Geomorfología. pp 241-258. En: Geología de Tucumán. F Aceñolaza; Bossi GE & Toselli A (eds.). Colegio de Graduados Ciencias Geológicas de Tucumán. San Miguel de Tucumán.
- Schwertmann, U. 1964. Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammoniumoxalat-Lösung. *Z. Pflanzenernähr, Düng., Bodenkunde* 105: 194-202.
- Soil Survey Staff, 1993. Handbook N° 18. USDA Washington, DC. 437 pp.
- Soil Survey Staff. 2006. Keys to Soil Taxonomy. USDA. Natural Resources Conservation Service. 10th ed. Washington, DC. 326 pp.
- Torres Bruchmann, EA. 1972. Mesoclimas de la Provincia de Tucumán. *Rev Agron del NOA IX* (3-4): 527-543.
- Vepraskas, MJ & LP Wilding. 1983. Aquic Moisture Regimes in soils with and without low chroma colors. *Soil Sci. Am. J.* 47: 280-285.
- Villegas, JA; MO Grondona; AM Romaro & HA Sánchez. 1981. Caracterización de la napa freática y su relación con las precipitaciones. EERA-INTA Famaillá. *Rev. Tec. INTA* 1(1): 353.
- Zuccardi, R & G Fadda. 1972. Mapa de reconocimiento de suelos de la Provincia de Tucumán. (Ed. UNT). Publ. Especial N° 3. 95 pp.
- Zuccardi, R & G Fadda. 1985. Bosquejo Agrológico de la Provincia de Tucumán. Fac. de Agronom. y Zoot. (Ed. UNT). Misc. 86. 65 pp.