

UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA

FACULTAD DE AGRONOMIA

MONTEVIDEO - URUGUAY

**DISTRIBUCION DEL HIERRO LIBRE
EN ALGUNOS SUELOS MUY LIXIVIADOS
DEL URUGUAY**

POR

LUIS DE LEON

MARLENNE YACOBAZZO DE DIAZ



DISTRIBUCION DEL HIERRO LIBRE EN ALGUNOS SUELOS MUY LIXIVIADOS DEL URUGUAY

LUIS DE LEÓN ¹ y MARLENNE YACOBAZZO DE DÍAZ ²

INTRODUCCION

Los fines específicos de este estudio son:

- 1) Comparar las curvas de distribución del hierro libre en algunos suelos muy lixiviados del Uruguay, con suelos-tipo del mundo, y eventualmente reclasificarlos.
- 2) Estudiar la correlación del transporte de óxidos libres con otros factores, y en particular el drenaje.

Formas del hierro en el suelo

Fuera de los minerales complejos inalterados, el hierro se encuentra en el suelo en cuatro formas fundamentales [Duchaufour (10)]:

- 1) Fijado por la arcilla, al estado de catión no intercambiable o poco intercambiable. Está en forma de puente entre la arcilla y el humus, floculado en agregados; se libera como hidrato coloidal al degradarse la estructura.
- 2) Óxidos de hierro libres e hidratos de hierro, formando películas y concrecionando partículas. Es común que evolucione rápidamente hacia las formas cristalinas. Según la naturaleza del mineral y su grado de hidratación el hierro puede dar al suelo colores característicos. En microclimas secos, las formas anhidras (hematita

1. Profesor Titular de la Cátedra de Edafología. Jefe del Departamento de Suelos de la Facultad de Agronomía.

2. Ayudante Técnico del Departamento de Suelos.

- Fe_2O_3) dan color rojo; formas poco hidratadas (goetita α Fe OOH) dan color ocre rojizo, y las formas más hidratadas de microclima húmedo ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dan al suelo color ocre. La limonita (partículas metacoloïdales de goetita con agua fijada por adsorción) (18) da al suelo color amarillo.
- 3) Formas solubles en medio reductor, como bicarbonato ferroso e hidróxido ferroso, en suelos de drenaje pobre.
 - 4) Pseudosoluciones o complejos con la M.O. y con la sílice. Lo más común es que el hierro se encuentre en forma de complejo ferri y ferrosilícico en medio poco ácido y pobre en humus, y ferroorgánico en medio ácido y rico en M.O. Son electronegativos y permanecen estables en presencia de calcáreo.

Condiciones y factores que afectan su movilización

Estudios anteriores han demostrado que en la movilización del hierro libre y su concentración, tienen influencia el pH, el drenaje, la vegetación y la textura.

pH.— En general el descenso de pH contribuye a su movilización y el ascenso a su precipitación. El hierro trivalente precipita a pH 3 ó más. El hierro ferroso comienza a precipitar a pH 5 y no está totalmente precipitado hasta pH 7 [Rankama (18)].

Debe anotarse que el pH de campo, principalmente tomado en microdimensión, puede ser más bajo que el de laboratorio, pero no lo suficiente como para solubilizar por sí solo al hierro férrico.

El pH tiene por otro lado una acción indirecta, ya que condiciona la formación de un determinado tipo de humus.

Según Duchaufour (10), “en suelos poco ácidos (pH 5-6) pobres en M.O. la movilización del hierro se hace como complejo ferrosilícico. En el horizonte B estos son destruidos, el hierro se fija sobre la arcilla y los dos elementos flocculan mutuamente. Por debajo de pH 5 y con alta materia orgánica hay un lavado masivo de coloides como complejos ferroorgánicos y aluminorgánicos. A pH 7 hay una débil migración del hierro. Por encima de este valor los coloides están totalmente flocculados; la migración es nula”.

Drenaje.— El drenaje actúa regulando las condiciones de oxidación reducción del suelo, y por lo tanto las distintas formas del hierro. Se interpreta a través del color del suelo y moteaduras de óxidos de hierro en el subsuelo. Estas pueden presentar todos los grados, del rojo al amarillo, según el grado de hidratación. Los tonos grises, gris azulado y gris verdoso,

denotan condiciones de mal drenaje con la consiguiente reducción de los óxidos de hierro.

Los suelos bien drenados acusan un débil transporte de hierro libre, paralelo al horizonte B textural.

Los suelos mal drenados presentan una remoción intensa de los óxidos en el horizonte A y marcada acumulación en el B.

En condiciones de drenaje imperfecto los suelos presentan menor remoción de óxidos en los horizontes superficiales, que los mal drenados, ya que retienen más hierro en forma concrecionada y tienen mayor temperización.

Vegetación y M.O.—Estudios anteriores hechos sobre una biosecuencia (7) muestran que bajo condiciones de drenaje normal, en los suelos de pradera el transporte de óxidos es débil, fuerte en los suelos de bosque, e intermedio en los suelos de transición pradera-bosque.

Estudios recientes realizados por investigadores alemanes, rusos e ingleses (18, 9), sobre la M.O. y su papel en el transporte del hierro, concluyen que:

1) Los ácidos fúlvicos (fracciones de pequeña molécula) ligados a los ácidos húmicos (fracción F2), son poco móviles y poco activos. Su acción sobre los minerales de arcilla y los óxidos es muy débil. En cambio los ácidos fúlvicos libres (fracción F1), muy solubles y fuertemente ácidos (ácidos y polifenoles) son los principales agentes de la degradación de las arcillas y movilización de los óxidos en la podzolización.

2) Entre los ácidos húmicos, que son los de molécula más condensada y ligados a las arcillas (complejo arcilla-humus), aquellos que están ligados por puentes de calcio (H2) y sobre todo los ligados por puentes de sesquióxidos (H3) son completamente estables e inactivos en condiciones naturales. Los ácidos húmicos libres (H1) o precursores, no son productos de síntesis, son productos de oxidación de la lignina (ácidos liginicos). Pueden ser dispersados y migrar en los podzoles arrastrando el hierro.

En los podzoles, suelos lixiviados y suelos podzólicos, predominan los ácidos fúlvicos y ácidos húmicos libres (H1). Pero mientras que en el podzol la fracción más importante es F1 y en los pardo podzólicos la H1, en los suelos lixiviados tanto F1 como H1 son abundantes [Duchaufour, 1957 (9)].

En el caso de los planosoles o pseudogleys, según Mückenhaussen (1963) (18), la acidificación y los períodos alternantes de humedad y sequía explican la formación de un humus de mala calidad. En el período de reducción, se forman en estos suelos suelos húmicos agresivos que actúan sobre el suelo descomponiendo, solubilizando y reduciendo [Iarkov, 1956; Anstett, 1956 (15, 1)].

Arcilla.— En suelos de pradera y gris pardo podzólicos bien drenados, la curva de distribución de óxidos se correlaciona con la curva de arcilla. También hay correlación hierro arcilla en los rojo amarillo podzólicos. En suelos imperfectamente drenados bajo pasto se mantiene la correlación, no así bajo vegetación de bosque. En suelos pobremente drenados la correlación hierro arcilla es nula, tanto bajo bosque como bajo pasto, salvo en los rojo amarillo podzólicos.

Formas en que se moviliza el hierro

El hierro puede mobilizarse en el suelo al estado de solución o en suspensión coloidal. Para ser transportado en la última forma es necesario que se den condiciones de dispersión en los horizontes superiores, y condiciones de coagulación o de oxidación en los inferiores, para que precipite.

Las condiciones que favorecen la dispersión son:

- Alto grado de hidratación.
- pH muy alejado del punto isoeléctrico.
- Bajo contenido de electrólitos.
- Ausencia de coloides con cargas opuestas dentro del mismo sistema.

Teóricamente el hierro puede moverse en el suelo en la siguiente forma:

- 1) Como catión trivalente Fe^{+++} , a pH menor que 3.
- 2) Como catión bivalente $[\text{OHFe} \text{ y } (\text{CO}_3\text{H})_2 \text{Fe}]$ en medio reductor, y desde pH 3 hasta pH 7.
- 3) Suspensión coloidal electropositiva de óxido de hierro.
- 4) Como pseudosolución (sol) de óxido de hierro protegida por sílice y cargada negativamente. Se ha demostrado que se requieren 13 partes de sílice para coagular una de óxido de hierro.
- 5) Pseudosolución de óxido de hierro, protegida por humus y cargada negativamente. Se ha demostrado que 1/3 de humus coagula 1 parte de hierro.
- 6) Ion orgánico electronegativo o complejo ferroorgánico, que puede migrar en medio ácido o alcalino, y no es fijado por la arcilla. Los agentes orgánicos que forman complejos con el hierro son, la fracción F1, F2 y H1 de la M.O., que lo transportan en forma soluble, gracias a su gran poder de reducción y solubilización.
- 7) En forma de películas sobre las partículas de arcilla. Este mecanismo ha sido estudiado por Mückenhausen (18) y admitido antes por Bloomfield (3).

En condiciones naturales, las formas principales son, el hierro como ion ferroso, como complejo ferroorgánico, como sol protegido por humus o por sílice, y como películas sobre la arcilla. La primera forma no se considera porque no es probable en condiciones naturales y la cuarta es también muy difícil que se produzca.

Los investigadores franceses (10) han llegado a determinar índices de transporte de hierro libre, para cada "tipo" de suelo. Estos índices se calculan por medio de la fórmula:

$$\frac{\text{hierro libre en el horizonte B}}{\text{hierro libre en el horizonte A}}$$

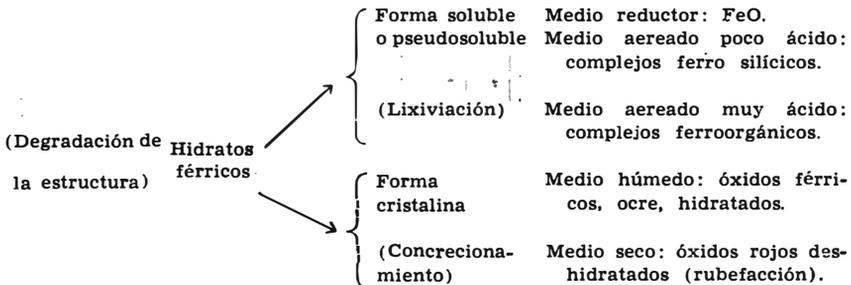
Han determinado para algunos "tipos" de la clasificación de suelos de Aubert-Duchaufour (10), los siguientes valores:

Suelo pardo ligeramente lixiviado	1,2 - 1,5
pardo lixiviado	1,5 - 2,0
lixiviado	2,0 - 3,0
lixiviado algo podzolizado	3,0 - 4,0
podzolizado	4,0 - 8,0
podzol	8,0

También han llegado a expresar en este esquema, la evolución de los óxidos de hierro en la degradación de los suelos pardos:

ESQUEMA DE LA EVOLUCION DE LOS OXIDOS DE HIERRO
EN EL CURSO DE LA DEGRADACION
EN LOS SUELOS PARDOS (Ph. Duchaufour, 1960)

Complejos arcilla-humus-hierro (floculados en agregados)



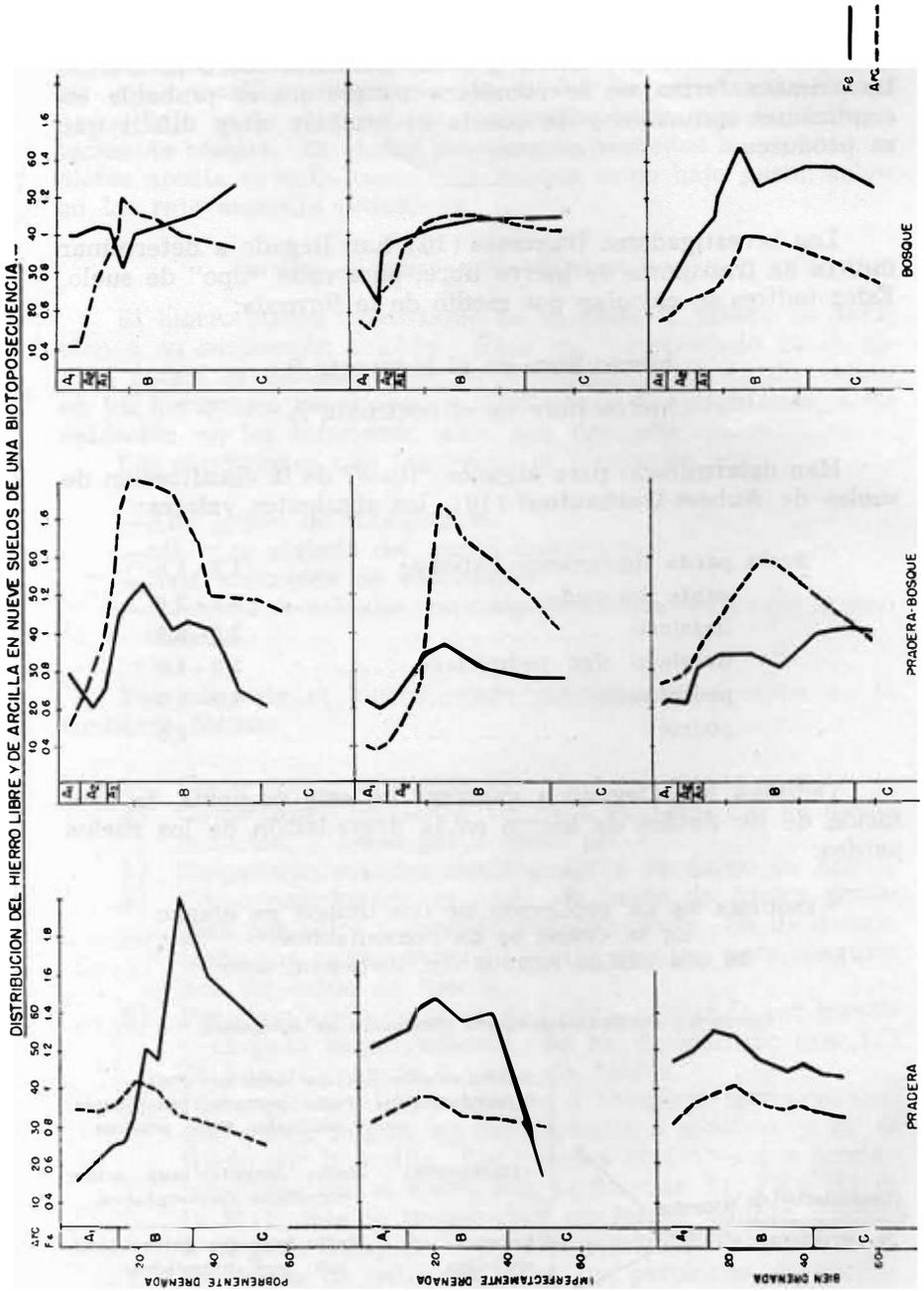


FIG. 1.— Distribución de hierro libre y de arcilla en una biotipo secuencia de suelos de U.S.A.

Asimismo las investigaciones realizadas en U.S.A. han llegado a determinar las curvas tipo de distribución de los óxidos de hierro para los grandes grupos de suelos de su esquema de clasificación. Estas curvas se muestran en la página siguiente.

Se establecerán comparaciones de los datos de los suelos en estudio, con los índices europeos y las curvas tipo de U.S.A.

MATERIAL Y METODOS

Se trabajó con nueve suelos, desarrollados sobre tres materiales geológicos diferentes. Todos ellos han sido clasificados dentro del gran grupo de praderas arenosas [Riecken, 1957 (21)] y designadas como:

- Serie Rivera.
- ” Tranqueras.*
- ” Arroyo Laguarda.
- ” P 37.**
- ” Buena Vista.
- ” Las Toscas.
- ” Chapicuy.
- ” Coquimbo y
- ” San Jacinto.

Las cuatro primeras series se han desarrollado sobre areniscas de Tacuarembó. “Este material geológico pertenece a la era secundaria; son areniscas de colores variables y granulación media, el cuarzo es el material detrítico dominante y hay pequeña proporción de minerales feldespáticos. El cemento es arcilloso y localmente ferruginoso” (13).

“El material original de la serie Buena Vista es la arenisca del mismo nombre, de edad primaria; son areniscas blandas, rojas, comúnmente con fajas grises, a veces con bandas de arcilla rojo oscuro; localmente arenosas” (13). Sobre esta arenisca se han desarrollado las series Buena Vista y Las Toscas.

Las tres series siguientes sobre material del cretácico, de la era secundaria; Chapicuy y Coquimbo sobre material de Guichón, areniscas arcillosas, rojizas, de grano fino, algo irregular, con cantos en la base. El contenido en cemento arcilloso es siempre algo elevado. La serie San Jacinto se ha formado sobre el facies de Míguez también de edad cretácica.

* Actualmente se reconsidera la designación de esta serie.

** Actualmente designada serie Los Médanos.

El gran grupo de praderas arenosas fue definido como: suelos ácidos, de texturas livianas, colores claros y en general bien drenados. Con bajo contenido de M.O. (menos de 3%), baja capacidad de intercambio y porcentaje medio de saturación de bases (40-55%), aunque para los suelos del país este porcentaje es bajo.

Los colores en el horizonte B varían desde colores rojos, pasando por amarillos, hasta grises. A veces presentan mezcla de colores, moteado y concreciones de Fe-Mn. Las series Rivera, Tranqueras y Las Toscas, se han separado como praderas arenosas rojas; Arroyo Laguardia como pradera arenosa amarilla y P 37 pradera arenosa con marcado hidromorfismo en el perfil. La serie Buena Vista presenta color gris más uniforme en el perfil y se ha separado como pradera arenosa gris.

Los nueve suelos analizados son de textura liviana; Coquimbo, Chapicuy y San Jacinto son en general de colores pardo grisáceo y más oscuros en el horizonte B. Se dan a continuación las características de cada serie:

Serie Las Toscas.— Suelos de perfil diferenciado, profundo, arenoso en superficie y subsuelo arcillo arenoso, de reacción ácida (5,2-5,5), baja capacidad de intercambio y bajo porcentaje de saturación de bases. La materia orgánica aumenta en el subsuelo.

Serie Rivera.— Incluye suelos bien desarrollados, de textura arenoso franco en superficie y arcillo arenoso en el subsuelo; fuertemente ácidos y bien drenados. Pardo rojizo oscuro en superficie y subsuelo rojo. Se da en topografía de pendiente moderada y relieve ligeramente convexo. La vegetación natural es, como en todos los suelos estudiados, de pradera.

Serie Tranqueras.— El perfil es menos rojizo que el anterior, presenta colores pardo grisáceo a pardo amarillento, con algún moteado. Se da en topografía ondulada a ondulada fuerte.

Serie Arroyo Laguardia.— Esta serie tiene un perfil de colores más amarillentos que las dos anteriores y abundante moteado. El horizonte superior es arenoso franco, pardo amarillento oscuro y el horizonte B, franco arcillo arenoso pesado con colores mezclados, manchas y moteado amarillento. Este perfil fue recogido al pie de la Sierra La Aurora.

Serie Chapicuy.— Es un suelo bien diferenciado, su textura va de arenoso franco en el horizonte A a franco arcillo arenoso pesado en el horizonte B. Este horizonte es negro con abundante moteado rojo oscuro, más oscuro que en la serie Rivera y más rojizo que en la serie San Jacinto. Es de relieve convexo, topografía suave a moderada con laderas largas.

CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LOS SUELOS

Series	Posición fisiográfica	% de pen- diente	Drenaje *	Suelo superficial	Subsuelo	Material madre
LAS TOSCAS	Laderas convexas.	3-4%	Bueno.	Pardo rojizo oscuro (5 YR 3/4). Arenoso.	Rojo osc. (2.5 YR 3/6). Arcillo arenoso.	Rojo. Arenoso. Arenisca de Buena Vista.
RIVERA	Laderas lig. a mod. convexas.	4-5%	Bueno.	Pardo rojizo oscuro (3 YR 3/4). Arenoso franco.	Pardo rojizo oscuro. Arcillo arenoso.	Rojo oscuro. Arcillo arenoso. Areniscas de Tacuarembó.
TRANQUERAS	Laderas. Relieve ondulado a ond. fuerte.	5-7%	Mod. bueno.	Pardo amarillento oscuro (10 YR 4/4). Arenoso.	Pardo rojizo oscuro (2.5 YR 3/4). Arcillo arenoso.	Rojo osc. (2.5 YR 3/6). Arcillo arenoso. Arenisca de Tacuarembó.
A. LAGUARDIA	Ladera media lig. convexa.	2-3%	Imperfecto.	Pardo grisáceo (10 YR 4/2). Arenoso franco.	Pardo amarillento (10 YR 4.5/4). Franco arcilloso arenoso pesado.	Pardo amarillento y moteado amarillento rojizo. Franco arcillo arenoso. Arenisca de Tacuarembó.
P 37	Ladera baja, aluvial coluvial.	4-5%	Pobre.	A. Gris a pardo grisáceo muy oscuro (10 YR 3/1.5). Franco arenoso fino. - A. Gris a pardo grisáceo oscuro (10 YR 4/1.5) con ligero moteado rojizo. Arenoso franco. - A. Gris claro (10 YR 6.5/1). Arenoso suelto.	Pardo amarillento (10 YR 5/8) y pardo amarillento claro (10 YR 6/4). Arcillo arenoso. Conc. grandes de Fe y Mn.	Gris claro a blanco (10 YR 7.5/1.5) con motas y manchas. Franco arcillo arenoso. Arenisca de Tacuarembó.
B. VISTA	Ladera alta convexa.	3-5%	Imperfecto a algo pobre.	A. Gris oscuro (10 YR 3/1). Franco arenoso medio. - A. Pardo grisáceo oscuro (10 YR 4/2). Arenoso franco.	Gris oscuro (10 YR 3/1) con algún moteado. Arcillo arenoso pesado.	Amarillento claro con moteado rojizo. Arenisca de Buena Vista poco alterada.
S. JACINTO	Laderas largas lig. convexas; aluvial coluvial.	2-3%	Imperfecto.	Pardo grisáceo muy oscuro (10 YR 3/2). Franco arenoso.	Pardo rojizo oscuro a pardo grisáceo oscuro (5 YR 3/2 a 10 YR 3/2). Franco arcilloso pesado.	Areniscas del facies de Miguez, alterado, pardo rojizo, no calcáreo.
CHAPICUY	Laderas largas convexas.	3-6%	Mod. bueno a imperfecto.	Pardo oscuro (7.5 YR 3/2). Arenoso franco.	Gris muy oscuro (10 YR 3/1) con abundante moteado rojizo oscuro (2.5 YR 3/6) y pardo amarillento (10 YR 5/6). Arcillo arenoso liviano.	Areniscas de Guichón. Pardo rojizo oscuro. Franco arcillo arenoso.
COQUIMBO	Ladera alta lig.	2-3%	Imperfecto.	Pardo grisáceo oscuro (10 YR 4/2). Arenoso medio.	Negro (10 YR 2/1). Gris oscuro (10 YR 4/1) y pardo grisáceo (10 YR 5/2) con moteado rojizo (10 YR 4/8). Arcillo arenoso.	Arenisca de Guichón. Pardo rojizo. Franco arcillo arenoso.

* Drenaje apreciado en el campo.

Serie San Jacinto.—Pardo grisáceo oscuro en el horizonte A y pardo rojizo oscuro a pardo grisáceo oscuro en el B. La textura de este suelo es franco arenosa en superficie y franco arcillo arenosa pesada en el B. Relieve suavemente convexo con pendientes suaves y alargadas.

Serie Coquimbo.—Esta es la serie más diferenciada. El orden de diferenciación de los suelos sobre cretácico es: Chapicuy, San Jacinto y Coquimbo. Esta diferenciación es paralela a la presencia de moteado que es muy abundante en esta serie. La textura es arenosa media en el horizonte A y arcillo arenosa en el horizonte B. Pardo grisáceo oscuro en superficie y gris muy oscuro con moteado rojo muy oscuro con moteado rojo muy abundante en el B.

Serie Buena Vista.—Presenta un horizonte A₁ franco arcilloso arenoso medio, un A₂ de textura más liviana y horizonte B arcillo arenoso fino pesado, con película de arcilla cubriendo los agregados; este suelo presenta un horizonte B de fuertes estructuras prismáticas, gris muy oscuro con algún moteado.

Todos estos suelos se caracterizan por presentar niveles bajos de M.O. en relación a los demás suelos de la zona (valores aproximados a 1% para la mayoría y próximo a 2% en la serie Chapicuy). Se observa en los primeros suelos que el C orgánico sube en el horizonte B, luego de descender en el A inferior. Lo mismo sucede para el nitrógeno.

A continuación siguen los datos morfológicos y características asociadas de los suelos.

Método de análisis

Los suelos fueron analizados por el método del hidrosulfito de sodio de Galabutskaye (1934), ajustado posteriormente por Deb (1949) (5), Kilmer (1960) (17) y Daniels (1961).

Si bien no hay un método ideal para la extracción de los óxidos libres, ya anteriormente varios investigadores han realizado estudios de este método comparándolo con los propuestos por Tamm y Schofield y con los de Tamm, Drosdoff y Trnog y Jeffries [Robichet, 1957 (22)]; o bien probándolo frente a minerales puros, y en diferentes suelos [Robichet, 1957 (22); De León, 1961 (8)].

Todos han concluido que es el método más eficiente, no destruye minerales ricos en hierro como la clorita, del cual sólo extrae pequeñas cantidades de hierro y no ataca la estructura de la biotita; las concreciones de hierro y manganeso del suelo son atacadas.

El método consiste en colocar en vaso de Bohemia de 250 c.c., 4 gr. de suelo secado al aire y tamizado a 2 mm. y

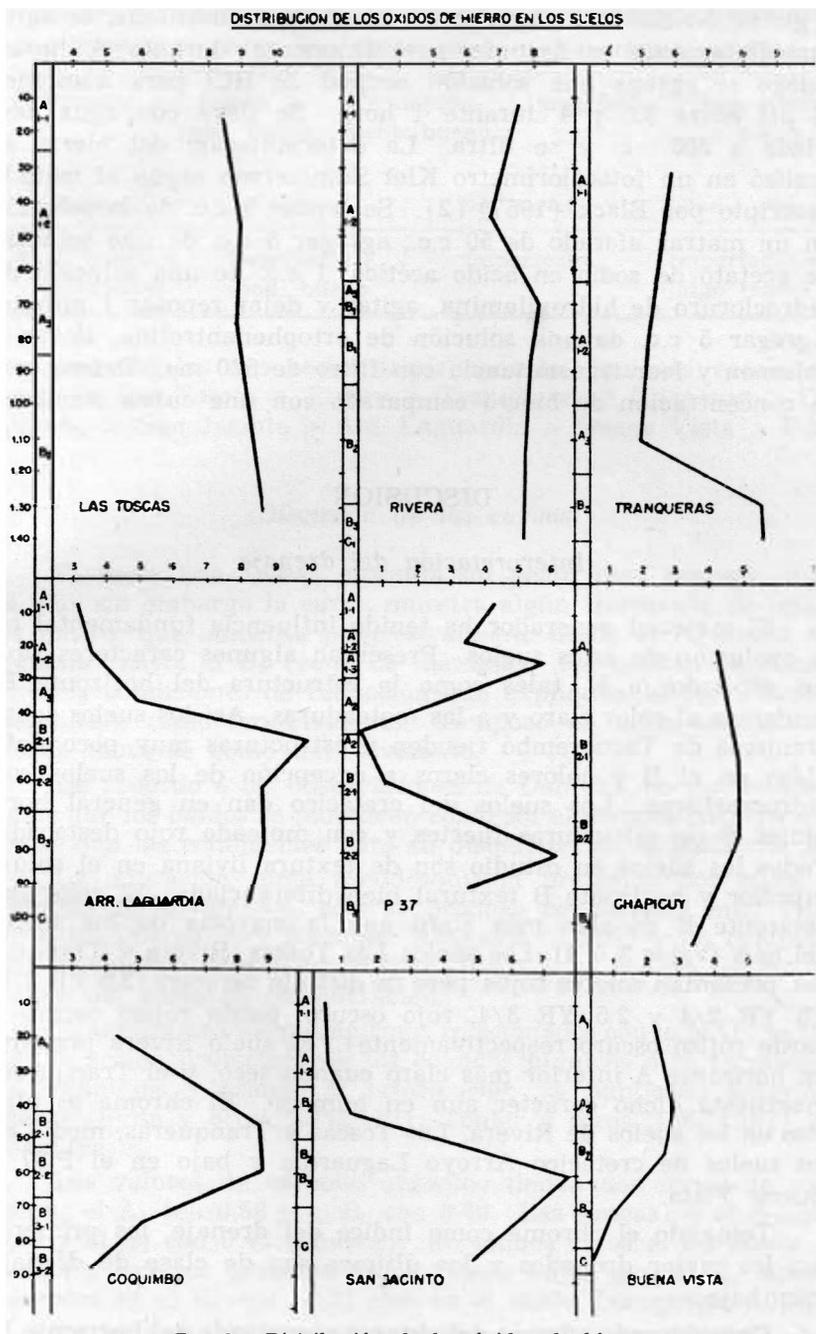


FIG. 2.— Distribución de los óxidos de hierro en los nueve suelos estudiados.

4 gr. de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$. Se agrega 75 c.c. de agua destilada, se agita inmediatamente y después periódicamente durante 4 horas. Luego se agrega una solución normal de HCl para mantener el pH entre 3.5 y 4 durante 1 hora. Se lleva con agua destilada a 200 c.c. y se filtra. La determinación del hierro se realizó en un fotocolorímetro Klet Summerson según el método descrito por Black (1957) (2). Se toman 5 c.c. de la solución en un matraz aforado de 50 c.c., agregar 5 c.c. de una solución de acetato de sodio en ácido acético, 1 c.c. de una solución de hidrocloreuro de hidroxilamina, agitar y dejar reposar 1 minuto. Agregar 5 c.c. de una solución de ortophenantrolina, llevar a volumen y leer transmitancia con filtro de 520 m μ . Determinar la concentración de hierro comparado con una curva standard.

DISCUSION

Interpretación del drenaje

El material generador ha tenido influencia fundamental en la evolución de estos suelos. Presentan algunos caracteres típicos asociados a él, tales como la estructura del horizonte B, tendencia al color claro y a las moteaduras. Así los suelos sobre areniscas de Tacuarembó tienden a estructuras muy poco definidas en el B y colores claros a excepción de los suelos con hidromorfismo. Los suelos del cretácico dan en general horizontes B de estructuras fuertes y con moteado rojo destacado. Todos los suelos en estudio son de textura liviana en el solum superior y horizonte B textural bien diferenciado. El color del horizonte B es algo más claro que la mayoría de los suelos del país (valor 3 ó 4). Los suelos Las Toscas, Rivera y Tranqueras, presentan colores rojos, pero de distinto carácter (2,5 YR 3/6, 2,5 YR 2/4 y 2,5 YR 3/4, rojo oscuro, pardo rojizo oscuro y pardo rojizo oscuro respectivamente). El suelo Rivera presenta un horizonte A inferior más claro cuando seco, y el Tranqueras manifiesta dicho carácter aun en húmedo. El chroma es algo alto en los suelos de Rivera, Las Toscas y Tranqueras, medio en los suelos de cretácico Arroyo Laguardia y bajo en el P 37 y Buena Vista.

Tomando el chroma como índice del drenaje, los primeros son los mejor drenados y los últimos son de clase de drenaje más bajo.

Considerando además del chroma el moteado del horizonte B, podemos ordenar los suelos por su drenaje como siguen:

<i>Las Toscas</i>	<i>Rivera</i>	<i>Tranqueras</i>	<i>A. Laguardia</i>	<i>P 37</i>
Bueno.	Bueno a mod. bueno.	Moderadamente bueno.	Imperfecto.	Imperfecto a pobre.
<i>Chapicuy</i>	<i>Coquimbo</i>	<i>San Jacinto</i>	<i>Buena Vista</i>	
Mod. bueno a imperfecto.	Imperfecto a mod. bueno.	Imperfecto.	Imperfecto a algo pobre.	

Uniendo las dos series tendríamos la siguiente escala de drenaje: Las Toscas > Rivera > Tranqueras > Chapicuy > Coquimbo > San Jacinto > Arr. Laguardia > Buena Vista > P 37.

Discusión de las curvas

El suelo Las Toscas presenta un perfil bien drenado todo el año, sin embargo la curva muestra algún transporte de óxido de hierro, que aumenta progresivamente desde el A₁ (zona de mínima) hasta el B₂ (zona de máxima). No existen en consecuencia condiciones de reducción que expliquen la movilización del hierro como ion bivalente. Tampoco en estas condiciones puede moverse como ion trivalente.

De acuerdo a las observaciones de Deb (5), no puede aceptarse que los óxidos se movilicen como sol electropositivo, ya que no se dan las condiciones para su dispersión en el horizonte A₁.

La migración como pseudosolución protegida por sílice y cargada negativamente, sólo se produce con niveles muy altos de sílice [Demolon y Bastisse; Rankama (6, 20)] y en condiciones de ligera acidez [Duchaufour (10)]; estas no son las condiciones del suelo en consideración.

Si analizamos los mecanismos relacionados con la M.O., ya sea por la acción protectora de los coloides húmicos o la formación de complejos y usando la información ya publicada anteriormente [Fynn y otros, 1958 (12); Tobler y otros, 1963 (25)], se concluye:

Los valores de carbono orgánico tienen dos zonas de máxima: el A₁ con 0,58 y el B₂ con 0,40 (Las Toscas) o el A₁ con 0,43 y el B₁ con 0,46 (Rivera). En ambos casos el horizonte A medio e inferior presenta valores más bajos que el B, siendo menores en el Rivera (0,2) que en el suelo Tranqueras (0,36).

En el suelo Rivera este horizonte A_{1,2} empobrecido algo en óxidos, corresponde en el perfil a un horizonte más claro,

de igual textura y pH que el superior A_{11} , pero con menos materia orgánica que el A superior y el B subyacente. Esto probaría una cierta movilización del hierro con la materia orgánica.

Este fenómeno de transporte de M.O. es característico de suelos podzólicos [Duchaufour, 1957; Hénin, 1948; Tiurin, 1951 (9, 14, 26)].

Dadas las condiciones de aquel suelo, de rápida mineralización (relación C/N baja), medio fuertemente ácido y bajo nivel de N, se formarían compuestos orgánicos muy activos que transportarían los óxidos; en el horizonte B se producirá una condensación y polimerización, en los períodos de sequía, proceso éste principalmente físico [Duchaufour, 1960; Iarkov, 1956; Los-saint, 1959; Robichet, 1957; Segalen, 1964; Kononova, 1961 (10, 15, 19, 22, 23, 27)], liberándose nuevamente el hierro que precipita como óxido.

El estudio de las fracciones de la M.O. permitirá en el futuro analizar al detalle los procesos bioquímicos de su evolución y explicar mejor los mecanismos de movilización del hierro.

Estos suelos presentan marcado transporte de arcilla que podría actuar como vehículo de los óxidos en forma de finas películas adsorbidas. Sin embargo, mientras el transporte de arcilla es muy marcado en Rivera y Las Toscas (arcilla en el B: arcilla en A = 5), la movilización de óxidos es mucho menor (óxidos en el B: óxidos en el A = 1,1 en Las Toscas, 1,3 en Rivera y 1,7 en Tranqueras). Esto indicaría la acción de un mecanismo diferente de transporte de los óxidos, relacionado a la movilización con la M.O.

Estudios de micromorfología y determinaciones químicas en micro podrían aclarar este problema.

Podría asimismo dejarse planteada la tesis de Simonson (24), de que en los suelos rojo podzólicos habría una destrucción de minerales de arcilla en el A y resíntesis en los horizontes inferiores.

Serie Laguardia y P 37.—Estos suelos presentan ya síntomas marcados de hidromorfismo como presencia de moteado, colores grises y amarillo, concreciones de hierro y manganeso y en general tonos más oscuros que en el horizonte A.

Hubiera sido de interés incluir aquí la serie Tacuarembó, en la que predominan los colores amarillos, con ligera segregación de óxidos.

Tanto la serie Laguardia como el P 37 presentan curvas muy acentuadas que expresan intensos procesos de transporte

de los óxidos desde el horizonte A hacia el B superior (serie Laguardia) o hacia el B medio o inferior (P 37). Esto ha traído como consecuencia que mientras el suelo Las Toscas conserva niveles de óxidos en el A de 8 a 9%, el Rivera entre 7 y 8% y Tranqueras menos de 5%, la serie Arroyo Laguardia presenta sólo 3% y P 37 llega en algunos horizontes a niveles tan bajos como 0,2%.

Estos suelos tienen condiciones temporarias de reducción que en P 37 comprende períodos muy largos en el año. Este factor debe considerarse de gran importancia en el análisis del proceso. Durante la estación húmeda se producirían compuestos orgánicos solubles, muy activos, con gran capacidad de ataque y transporte de los óxidos; por otra parte, la actividad biológica durante esos períodos conduce a un aumento marcado de las condiciones de reducción y liberación de hierro bivalente, que se moviliza fácilmente en solución [Betremiex, 1955 (4)].

Las condiciones de reducción son mucho más acentuadas en el P 37, lo que explica la mayor pérdida de óxidos en el A cuando se lo compara con el Arroyo Laguardia. Debe considerarse también la posibilidad de movilización de los óxidos en suspensión con la arcilla. El suelo Arroyo Laguardia presenta bastante paralelismo de la curva de óxidos con la de arcilla en los horizontes superiores (A y B superior) y un descenso de los óxidos en el B inferior y C, muy pequeño; esto último no puede relacionarse con la arcilla, en consecuencia debe atribuirse mayor influencia a las condiciones de reducción del suelo.

En el P 37 la zona de máxima acumulación de los óxidos se corresponde con el B22, pero el B21 que es también un horizonte de gran acumulación de arcilla presenta una fuerte pérdida de óxidos. Esto denota que el mecanismo fundamental de movilización deriva de las condiciones de reducción, y no debe correlacionarse con la arcilla.

La mayor diferenciación del P 37 y su posición en el paisaje, explican la acentuación de las condiciones de reducción, causa principal de la evolución de los óxidos.

Resta aún explicar los valores altos que el P 37 presenta en el horizonte A₁. Estudios anteriores [Runge y De León, 1960 (7); De León, 1961 (8)] mostraron que en suelos forestales con problemas de drenaje, puede presentarse este fenómeno, y también en los suelos cumúlicos. Como en este caso la vegetación es de pradera, podría explicarse por este segundo mecanismo.

Finalmente puede agregarse la movilización oblicua de los óxidos, ya que es un suelo de ladera baja, sobre una arenisca muy estratificada.

Suelos de material cretácico y Buena Vista.— La serie Chapiçuy acusa un débil transporte de óxidos y el tipo de curva es similar a la curva de óxidos de los suelos de pradera bien drenados. El índice de transporte es igual a 1,2. La zona de máxima corresponde a la de máxima acumulación de arcilla, dando curvas paralelas. Conserva altos niveles de óxidos en el A, igual a 4% y 5% en el subsuelo.

El hierro sería transportado en forma reducida en cortos períodos del año, precipitando luego como concreciones o moteado rojizo en el B. La arcilla también jugaría aquí su función de vehículo. Finalmente se destaca el color negro en las caras de los agregados en el horizonte B, mientras que el color del A es pardo oscuro. Este fenómeno responde sin duda a un cierto transporte de materia orgánica que podría transportar algo de óxidos.

Estos mecanismos superpuestos actúan en este caso con una intensidad mínima, dando un índice de transporte poco mayor que 1.

El suelo Buena Vista presenta un índice de transporte de 1.18. La zona de máxima corresponde al A2 y B2 y la zona de mínima al A1. Esto se corresponde con un A1 gris oscuro uniforme y un A2 y B2 con algo de moteado rojizo. En este caso la movilización con arcilla no parece ser importante, ya que el A2, horizonte más pobre en arcilla, tiene el más alto porcentaje de óxidos del perfil.

En cambio las condiciones de reducción actúan en mayor escala, ya que el perfil muestra colores grises en todos sus horizontes. En estas condiciones el hierro se mueve como ion ferroso.

El suelo Coquimbo, cuyo índice de transporte es 2, presenta una curva muy marcada, con máxima acumulación en el B2. El paralelismo con la curva textura evidencia cierto transporte junto a la arcilla. La diferenciación textural de este perfil da condiciones de reducción en cierto período del año, lo que favorece también la movilización como hierro ferroso.

Este suelo no acusa transporte de materia orgánica; se descartaría entonces este mecanismo de transporte.

El suelo San Jacinto es el que acusa un transporte de hierro mayor del grupo de suelos del cretácico. Su índice es 26, la zona de máxima corresponde al B inferior y la zona de mínima a los horizontes A₁ y A₂, con valores menores de 1%.

En este caso cabe suponer que los dos mecanismos, hierro ferroso y transporte con la arcilla, tengan lugar con gran intensidad. No existe en este suelo transporte visible de materia orgánica.

Indices usados

Se intentó aplicar índices tipo de grandes grupos de suelos, que han sido expuestos anteriormente. Estos valores resultan demasiado bajos para los suelos estudiados, cuyos índices son los siguientes:

Las Toscas	1,13	Chapicuy	1,16
Rivera	1,32	Buena Vista	1,18
Tranqueras	1,79	Coquimbo	2,0
A. Laguardia	3.25	San Jacinto	26,0
P 37	31,0		

En general los índices estudiados en nuestros suelos arenosos con la misma lixiviación, están desplazados hacia valores más bajos. En otros casos superan los índices de un podzol, sin reunir el resto de sus características.

Los índices europeos no se ajustan a estos suelos, ya que están determinados sobre suelos de bosque, clima más frío con lluvias invernales, menor temperización y niveles menores de óxidos de hierro.

Comparación con las curvas tipo

Las curvas de Las Toscas, Rivera y Traqueras se correlacionan con curvas de suelos de bosques bien e imperfectamente drenados (U.S.A.). Arroyo Laguardia y San Jacinto con los suelos de pradera pobremente drenados. Buena Vista y Chapicuy con suelos de pradera bien drenados y Coquimbo con suelos de pradera imperfectamente drenados.

La serie P 37 no se ajusta estrictamente a ninguna de estas curvas.

Tampoco los criterios de drenaje usados en U.S.A. se ajustan a las condiciones de nuestros suelos. Nuestros suelos con drenaje imperfecto corresponden, según las curvas de distribución de óxidos, a los suelos pobremente drenados de U.S.A.

CONCLUSIONES

Los suelos Las Toscas, Rivera, Tranqueras, Arroyo Laguardia y P 37 pueden agruparse a "grosso modo", en función de sus curvas de óxidos y otras características del perfil.

Por otra parte, se agruparían los suelos Coquimbo, Chapicuy, Buena Vista y San Jacinto.

Los primeros acusan curvas similares a las de suelos podzolizados; los segundos dan curvas similares a los suelos de pradera bajo diferentes condiciones de drenaje.

Solamente dos suelos del primer grupo: Arroyo Laguardia y P 37, y San Jacinto del segundo grupo, dan índices de transporte de óxidos mayores de 3, valor mínimo para suelos podzólicos en Europa.

Los demás suelos analizados acusan índices menores de 3, correspondientes a suelos lixiviados.

Las demás características que permiten agruparlos son:

Para el primer grupo:

- Transporte de M.O. con un claro descenso en el A inferior y un aumento en el horizonte B, dando cierto paralelismo de las curvas de materia orgánica y de óxidos (a excepción de Arroyo Laguardia).
- Bajos valores de pH: 5.2 en promedio.
- Bajos niveles de materia orgánica: 1% en promedio.
- Material madre: arenisca cuarzosa muy pobre en bases, ácida, permeable, con arcilla de tipo caolinita.
- Transporte de óxidos libres de hierro con tendencia a desarrollar curvas con A₂ como en suelos de bosque o de transición pradera-bosque.
- Morfología de estos suelos similar a algunos suelos ocre podzólicos y rojo amarillo podzólicos.

Para el segundo grupo:

- No acusan al análisis transporte evidente de M.O.
- Curvas de óxidos con cierto paralelismo a la curva de arcilla.
- Niveles más altos de materia orgánica que el grupo anterior y colores más oscuros (2% de humus en promedio).
- Material original más rico en bases, más arcilloso que en el primer grupo y con arcilla de tipo montmorillonita e illita.
- Transporte de óxidos de hierro con tendencia a dar curvas similares a las de los suelos de pradera con distintas clases de drenaje.
- Morfología similar a las praderas muy diferenciadas y de tipo planosólico.

De lo expuesto se concluye que los suelos analizados evidencian procesos de lixiviación (transporte de arcilla y óxidos de hierro).

Algunos de ellos: Arroyo Laguardia, P 37 y San Jacinto, han sufrido además marcados procesos de hidromorfismo.

Estos últimos suelos acusan además índices de transporte de hierro correspondientes a suelos podzolizados.

No es posible, sin embargo, concluir sólo en base a estos índices si en estos suelos existe o no podzolización (alteración química de arcilla).

Estudios posteriores de alúmina libre en el horizonte B y fraccionamiento de humus, probarán si hay destrucción de arcilla y liberación de sílice y alúmina, y qué fracciones de la materia orgánica la provocan.

En la segunda etapa de este trabajo se establecerá entonces la relación $\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3$ de los nueve perfiles estudiados, y tipos de humus de cada uno.

Esquemáticamente los procesos de génesis de estos suelos pueden interpretarse como sigue:

Dadas las condiciones climáticas del país, con períodos de lluvias concentrados en los meses menos cálidos del año, la lixiviación afecta a todos estos suelos con distintos grados de intensidad. Esto depende fundamentalmente de la permeabilidad de los materiales y de la estabilidad del complejo arcilla-humus de los suelos.

Sobre materiales muy livianos (arenas de Tacuarembó y Buena Vista) con permeabilidad moderada a alta, la lixiviación es intensa. El débil o nulo tenor en calcio de estos materiales favorece el proceso.

Hay entonces acidez original del material madre y desaturación y acidificación del suelo por lavado.

Este proceso de lixiviación es común en algunos suelos de clima atlántico en Europa (período de lluvias en los meses más fríos del año), como es el caso en los suelos en los que se determinaron los índices de transporte de óxidos de hierro (10, 11). La lixiviación es allí la primera fase de la degradación de los suelos pardos y se traduce por un descenso de la materia orgánica y un empobrecimiento general en bases.

La segunda fase es más lenta y responde a una vegetación más acidificante, dando lugar a un proceso evolutivo diferente según la naturaleza de la roca madre y las condiciones locales del suelo:

- a) sobre roca madre arenosa permeable el humus ácido provoca podzolización;
- b) sobre roca madre poco permeable el lavado permanece más superficial, se forma una napa temporaria, lo que provoca el moteado del perfil, típico de los suelos muy lixiviados con hidromorfismo.

Entendemos que los nueve suelos analizados tienen la primera fase en común, y en la segunda fase se bifurcan de acuerdo a la acidez, riqueza en bases y permeabilidad de los materiales.

En los suelos del primer grupo sobre roca ácida, permeable y con arcilla caolinítica, podría tener lugar una débil podzolización como segunda fase de degradación, y como fenómeno localizado en función del clima y del material madre. Esto no ha sido fehacientemente comprobado y queda como hipótesis de trabajo para un estudio posterior.

En los suelos del segundo grupo, con material madre menos ácido, menos permeable y con arcilla montmorillonita o illita, el proceso dominante de evolución es la lixiviación que al hacerse muy intensa da marcados procesos de gleización. Por lo tanto, la morfología de los suelos es la de una pradera muy diferenciada y aún de tipo planosol.

Finalmente, cualquier suelo de ambos grupos puede acusar intensos procesos de gleización, sea por un perfil genéticamente muy desarrollado, como por estar en una posición topográfica baja.

Este proceso es quizá el responsable de los altos índices de transporte de óxidos de hierro de los suelos Arroyo Laguardia, P 37 y San Jacinto.

SUMARIO

Se determinó hierro libre en nueve suelos de textura arenosa. Se comparan las curvas de distribución del mismo, con curvas e índices de transporte de hierro, de suelos tipo de U.S.A. y de Europa respectivamente.

Se estudia además el drenaje, en relación al color del suelo y al transporte de los óxidos de hierro.

Comparando con los padrones para suelos tipo de U.S.A. se agruparon las curvas de distribución de hierro en el suelo en: curvas-tipo de suelo podzolizado y curvas-tipo de suelos de pradera, con diferentes condiciones de drenaje.

Comparando con los índices europeos, solamente tres suelos alcanzan a valores de suelos podzolizados; el resto de ellos acusa índices correspondientes a suelos con distinto grado de lixiviación.

El primer grupo de suelos se ha formado sobre areniscas ácidas; sus valores de pH son bajos, bajos en materia orgánica y acusan transporte de la misma hacia horizontes inferiores.

El segundo grupo de suelos se ha formado sobre material geológico menos arenoso y más rico en bases; los niveles de materia orgánica son mayores que en el primer grupo, y no se evidencia transporte de la misma.

Se concluye que: todos los suelos analizados tienen procesos de lixiviación (transporte de arcilla y óxidos de hierro) y en algunos de ellos hay intensos procesos de gleyzación.

De los tres suelos que superan el índice 3, no es posible sin embargo concluir que exista podzolización. En una segunda etapa de este trabajo se establecerá la relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ y el tipo de humus de los nueve suelos estudiados, a fin de probar si existe o no destrucción de arcilla y qué fracciones del humus la provocan.

BIBLIOGRAFIA

1. ANSTETT, A.—Humification et potentiels electronique et protonique. VI^e. Congrès Intern. Sc. du Sol Paris, 1956, 11, 50.
2. BLACK, C. A. (1957).—*Laboratory methods of soil investigation: soil fertility*. (Mimeo.) Dept. of Agronomy, Iowa State University of Science and Technology. Ames, Iowa.
3. BLOOMFIELD, C. (1951).—Experiments in the mechanism of gley formation. *Journal of Soil Science*, 2: 196-211.
4. BETREMIEX, M. R. (1955).—Influence du plan d'eau sur la précipitation d'éléments minéraux dans le sol. *Comptes rendus des sciences de la Academie des Sciences*, T. 241: 816-818.
5. DEB, B. C. (1949).—The movements and precipitation of iron oxides in Podzol soils. *Journal of Soil Science*, 1: 112-122.
6. DEMOLON, A. et BASTISSE, E. M. (1938).—Sur quelques complexes colloïdaux du fer et du aluminium. *Annales Agronomiques*, 8: 6-22.
7. DE LEON, L. V. (1960).—Distribution of Mn in a Biotoposecuence of South eastern Iowa soils. *Proceedings of Iowa Academy of Science*, vol. 67, dec.
8. DE LEON, L. V. (1961).—*Thesis for Master of Science*. Ioka State University of Science, Ames, Iowa. 211 pages.
9. DUCHAUFOR, Ph. (1957).—*Pedologie. Tableaux descriptifs et analytiques des sols*. Ecoles National des Eaux et Forets, Nancy, 87 pages.
10. DUCHAUFOR, Ph. (1960).—*Précis de Pedologie*. Ecole Nationale des Eeux et Forets, Nancy. Masson et Cie. Editeurs, Paris.
11. DUCHAUROUR, Ph. (1960).—*La vegetation et les problemes de la Podzolisacion en climat temperé*. Rapports du sol et de la végétation, 23-26.
12. FYNN, C. A. y otros (1958).—*Suelos del Uruguay*. (Mimeog.)
13. GOÑI, J. y CAORSI, J. (1958).—Geología Uruguaya. *Instituto Geológico del Uruguay*, Montevideo, Boletín N^o 37: 73 págs.
14. HENIN, S. et BETREMIEX, M. R. (1948).—Essai de Pedologie experimentale. *Comptes Rendus Acad. Sci.* 227: 1393-1395.

15. IARKOV, S. P.—Dynamique saisonniere de certains processus dans les sols. *Vl^e. Congrès Intern. Sc. du Sol*, Paris, 1956, V. 66, vol. E, p. 401-405.
16. KILMER, V. J. (1960).—The estimation of free iron oxides in soils. *Soil Ccience Society of American Proceedings*, 24: 420-422.
17. MÜCKENHAUSEN, E. (1963).—Le pseudogley. *Science du sol* (nombre especial), Nº 1: 21-29.
18. LAPPARDU-HARGUES (1954).—*Precis de Mineralogie*. Masson et Cie. Paris.
19. LOSSAINT, R. (1959).—Etude experimental de la mobilizacion du fer des sols sur l'influence des litières. *Annales Agronomiques*, 10: 369-414, 493-542.
20. RANKAMA, K. y SAHANA (1962).—*Geoquímica*. Editorial Aguilar.
21. RIECKEN, F. R. (1957).—*Informe de la Misión de F.A.O. sobre los suelos del Uruguay*. Montevideo, (Mimeog.).
22. ROBICHET, O. (1957).—Recherches sur les oxides de fer et manganese dans les sols. *Anales Agronomiques*, 4: 511-572.
23. SEGALEN, P. (1964).—*Le fer dans le sols. Initiations, Documentations et Techniques*. O.R.S.T.O.M., Paris.
24. SIMONSON, G. H. (1960).—*Génesis of alluvium-derived soils in the willow River Valley, Iowa*. Unpublisher Ph. D. Thesis, Library, Iowa State University of Science, Ames, Iowa.
25. TOBLER, H. y otros (1963).—Serie Las Toscas. *Apartado de la Revista de la Facultad de Agronomía*. Montevideo, Uruguay.
26. TIURIN, I. V.—Vers une metode d'analyse pour l'étude comparative des constituans de l'humus du sol. *Trav. Inst. des Sols Dokutchaeiev*, XXXVIII, 1951, 32 p.
27. KONONOVA, M. M. (1961).—Soil Organic Matterits nature, its role in soil formation and in soil fertility. *The Academy of Sciences of the USSR*. The V. V. Dokuchaev Soil Institute. Pergamon Press.