

INFLUENCIA DE LA MATERIA ORGANICA Y MATERIALES AMORFOS EN  
LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO DE ALGUNOS  
SUELOS DE LA REGION DEL VOLCAN IRAZU

Tesis de Grado  
MAGISTER SCIENTIAE

José Israel Guerrero Prato



INSTITUTO INTERAMERICANO DE CIENCIAS AGRICOLAS DE LA OEA  
Centro Tropical de Enseñanza e Investigación  
Departamento de Cultivos y Suelos Tropicales  
Turrialba, Costa Rica  
Julio, 1974

INFLUENCIA DE LA MATERIA ORGANICA Y MATERIALES AMORFOS  
EN LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO DE  
ALGUNOS SUELOS DE LA REGION DEL VOLCAN IRAZU

Tesis

Presentada al Consejo de la Escuela para Graduados  
como requisito parcial para optar al grado de

Magister Scientiae

en el

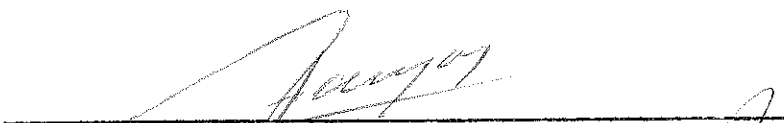
Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA

APROBADA:



Elemer Bornemisza, Ph.D.

Consejero



José Fargas, Ph.D.

Comité



Warren Forsythe, Ph.D.

Comité



Pablo Rosero, Mag. Agr.

Comité

Julio, 1974

DEDICATORIA

A la memoria de mi nona (q.e.p.d.)

A mi madre

A Lolo

A la abuelilla

## AGRADECIMIENTO

El autor desea expresar su agradecimiento:

- Al Dr. Elemer Bornemisza, Consejero Principal, por la orientación académica durante mi permanencia en el IICA y en el asesoramiento del presente trabajo.
- Al Dr. José Fargas, Dr. Warren Forsythe e Ing. Pablo Rosero, miembros del Comité Consejero, por su colaboración en la revisión del original.
- Al Ministerio de Agricultura y Cría, Venezuela, por haber patrocinado la realización de dicha investigación.
- Al Dr. Carlos Claverie, Dr. Jorge Casas Briceño, Dr. Alfredo Rivas Larraalde y Licda. Luisa Bustillos, que en conjunto contribuyeron para la realización de los estudios de postgrado.
- Al Dr. Eduardo Besoain y Dr. Fausto Maldonado, por su acertada dirección en algunos análisis de este estudio.
- Al Ing. Edgardo Ramírez, Sr. Eduardo Tencio, Sr. Manuel Zamora y a la señora Carmen Martín de Acuña, por el apoyo prestado a través del desarrollo de este tema.
- Al personal de la Biblioteca del IICA-CIDIA, por su eficaz ayuda en la consulta sobre la literatura.
- Al CTEI del IICA, al personal técnico, a compañeros de estudio y a todas las personas que en una u otra forma han colaborado en esta investigación.

## BIOGRAFIA

El autor nació en Maracay, Edo. Aragua, Venezuela. Los estudios secundarios los realizó en el Liceo "Andrés Bello" de la ciudad de Caracas. Sus estudios universitarios los efectuó en Venezuela y Perú, obteniendo el título de Ingeniero Agrónomo en la Universidad Nacional "San Luis Gonzaga", Ica, Perú en 1960. Ingresó en el mismo año al Ministerio de Agricultura y Cría de Venezuela, desempeñando diversos cargos en la División de Conservación de Suelos y Aguas de la Dirección de Recursos Naturales Renovables.

En setiembre de 1972 ingresó a la Escuela para Graduados del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA, en Turrialba, Costa Rica, para realizar estudios de postgrado en la especialidad de suelos, habiendo obtenido el grado de Magister Scientiae en julio de 1974.

## CONTENIDO

	<u>Página</u>
LISTA DE CUADROS .....	viii
LISTA DE CUADROS DEL APENDICE .....	ix
LISTA DE FIGURAS .....	xi
NOMENCLATURA DE LOS SUELOS ESTUDIADOS .....	xii
NOMENCLATURA DE LAS CARACTERISTICAS FISICAS Y QUIMICAS .....	xiii
1. INTRODUCCION .....	1
2. REVISION DE LITERATURA .....	5
2.1 Suelos derivados de cenizas volcánicas (andosoles) .....	5
2.2 Capacidad de intercambio catiónico .....	11
2.3 Fracciones de la materia orgánica .....	14
2.4 Oxidos hidratados "libres" de Fe y Al .....	16
2.5 El alofán .....	18
2.6 Espectrofotometría infrarroja .....	22
3. MATERIALES Y METODOS .....	24
3.1 Suelos estudiados .....	24
3.2 Análisis físicos .....	35
3.2.1 Características físicas generales .....	35
3.3 Análisis químicos .....	36
3.3.1 Características químicas generales .....	36
3.3.2 Capacidad de intercambio catiónico .....	38
3.3.3 Estudio de las fracciones de la materia orgánica .....	38
3.3.4 Oxidos hidratados "libres" .....	39
3.3.5 Alofán .....	40
3.3.6 Espectrometría infrarroja .....	41
3.4 Análisis mineralógico .....	41
3.5 Técnicas estadísticas .....	42
4. RESULTADOS .....	45
4.1 Características generales de los suelos estudiados .....	45
4.2 Capacidad de intercambio catiónico .....	47

	<u>Página</u>	
4.3	Fracciones de la materia orgánica .....	53
4.4	Oxidos hidratados "libres" .....	56
4.5	Alofán .....	60
4.6	Espectrometría infrarroja .....	64
4.6.1	Rancho Redondo Superficial .....	64
4.6.2	Rancho Redondo Profundo .....	64
4.6.3	Durazno Superficial .....	64
4.6.4	Durazno Profundo .....	68
4.6.5	Sanatorio Durán Superficial .....	68
4.6.6	Sanatorio Durán Profundo .....	68
4.6.7	Pavas Superficial .....	68
4.6.8	Pavas Profundo .....	69
4.6.9	Cot Superficial .....	69
4.6.10	Cot Profundo .....	69
4.6.11	La Chinchilla Superficial .....	69
4.6.12	La Chinchilla Profundo .....	69
4.6.13	Coronado Superficial .....	69
4.6.14	Coronado Profundo .....	70
4.6.15	La Rueda Superficial .....	70
4.6.16	La Rueda Profundo .....	70
4.7	Análisis mineralógico .....	71
4.7.1	Rancho Redondo Profundo .....	71
4.7.2	Pavas Superficial .....	71
4.7.3	Pavas Profundo .....	71
4.7.4	Cot Profundo .....	72
4.7.5	La Rueda Profundo .....	72
5.	DISCUSION .....	73
5.1	Características generales .....	73
5.2	Capacidad de intercambio catiónico (CIC) .....	76
5.3	Fraccionamiento de la materia orgánica .....	85
5.4	Oxidos hidratados "libres" .....	87
5.5	Alofán .....	90
5.6	Espectrofotometría infrarroja .....	92
5.7	Análisis mineralógico .....	95
6.	CONCLUSIONES .....	97
7.	RESUMEN .....	100
7a.	SUMMARY .....	102
8.	LITERATURA CITADA .....	104
9.	APENDICE .....	119

## LISTA DE CUADROS

<u>Cuadro N°</u>		<u>Página</u>
1	Características climáticas de los sitios correspondientes a los suelos estudiados .....	26
2	Características químicas de los suelos y subsuelos estudiados .....	46
3	Propiedades físicas de ocho suelos superficiales y subsuperficiales .....	48
4	Capacidad de intercambio catiónico de ocho suelos y subsuelos determinados con cinco métodos en muestras secas (S), húmedas (H) y sin materia orgánica (SMO) .....	49
5	Correlaciones de la CIC obtenidas por cinco métodos con las características químicas estudiadas de los ocho suelos superficiales y subsuperficiales .....	50
6	Porcentajes de las fracciones orgánicas en el carbono total y sus relaciones en ocho suelos y subsuelos determinados en seco y húmedo .....	54
7	Correlaciones de las fracciones de la materia orgánica con otras características químicas de los suelos estudiados .....	55
8	Contenido de óxidos "libres" en ocho suelos y subsuelos determinados por tres métodos en muestras secas y húmedas .....	57
9	Correlaciones de los óxidos hidratados "libres" con otras características de los suelos estudiados .....	58
10	Determinación del alofán por dos métodos en ocho muestras superficiales y subsuperficiales del Irazú .....	61
11	Correlaciones del alofán con otras características de los ocho suelos superficiales y subsuperficiales .....	62
12	Determinación de alofán (material amorfo) y óxidos "libres" en ocho muestras superficiales y subsuperficiales .....	63



## LISTA DE CUADROS DEL APENDICE

<u>Cuadro N°</u>		<u>Página</u>
1	Determinación de textura en algunos suelos estudiados por el método de dispersión de Ahmad y Prashad .....	120
2	Otras propiedades físicas de los suelos superficiales y subsuperficiales estudiados .....	121
3	CIC por el método de resina .....	122
4	Cationes cambiabiles determinados por el método de resina en los suelos superficiales y subsuperficiales .....	123
5	Determinación de cationes cambiabiles por el método modificado de Díaz-Romeu - Balerdi en ocho suelos superficiales y subsuperficiales ....	124
6	Suma y saturación de bases de los métodos de resina y modificado de Díaz-Romeu - Balerdi en los suelos estudiados .....	125
7	Determinación de hierro y aluminio intercambiabiles por el método de resina en ocho suelos superficiales y subsuperficiales .....	126
8	CIC de las fracciones orgánicas determinadas por dos métodos químicos en ocho suelos y subsuelos .....	127
9	Coefficientes lineales de las características químicas estudiadas en los ocho suelos superficiales y subsuperficiales .....	128
10	Ecuaciones de regresiones de las características químicas en los suelos estudiados .....	129
11	Regresiones múltiples de los cinco métodos usados de la CIC en los suelos estudiados .....	130
12	Regresiones múltiples de las características químicas estudiadas en los ocho suelos superficiales y subsuperficiales .....	131

<u>Cuadro N°</u>		<u>Página</u>
13	Prueba de Duncan de los métodos usados en la CIC de los suelos estudiados ( $P < 0,01$ ) .....	132
14	Composición mineralógica de la fracción arena ( $50 \mu - 500 \mu$ ) de algunas muestras en los suelos estudiados .....	133
15	Humedad perdida al secar los suelos estudiados a $105^{\circ}\text{C}-110^{\circ}\text{C}$ .....	134
16	Correlaciones de la CIC entre los métodos usados en los suelos estudiados .....	135
17	Regresiones múltiples para los métodos de la CIC en muestras en seco, húmedo y sin materia orgánica de los suelos estudiados .....	136
18	Densidad de la materia orgánica de los suelos estudiados .....	137

## LISTA DE FIGURAS

<u>Figura N°</u>		<u>Página</u>
1	Esquema de las reacciones probables y productos que se forman durante la meteorización de las cenizas volcánicas en ambientes de humedad y drenaje adecuados .....	8
2	Localización de los sitios de muestreo en el área de estudio .....	27
3	Diagramas de absorción infrarroja de los patrones de minerales amorfos y cristalinos estudiados en este trabajo .....	65
4	Diagramas de absorción infrarroja de las muestras menos desarrolladas, superficiales y subsuperficiales de la región del Volcán Irazú .....	66
5	Diagramas de absorción infrarroja de las muestras más desarrolladas, superficiales y subsuperficiales de la región del Volcán Irazú .....	67

## NOMENCLATURA DE LOS SUELOS ESTUDIADOS

RR <sub>1</sub>	=	Rancho Redondo Superficial
RR <sub>2</sub>	=	Rancho Redondo Profundo
D <sub>1</sub>	=	Durazno Superficial
D <sub>2</sub>	=	Durazno Profundo
SD <sub>1</sub>	=	Sanatorio Durán Superficial
SD <sub>2</sub>	=	Sanatorio Durán Profundo
P <sub>1</sub>	=	Pavas Superficial
P <sub>2</sub>	=	Pavas Profundo
Ct <sub>1</sub>	=	Cot Superficial
Ct <sub>2</sub>	=	Cot Profundo
CH <sub>1</sub>	=	La Chinchilla Superficial
CH <sub>2</sub>	=	La Chinchilla Profundo
Cd <sub>1</sub>	=	Coronado Superficial
Cd <sub>2</sub>	=	Coronado Profundo
LR <sub>1</sub>	=	La Rueda Superficial
LR <sub>2</sub>	=	La Rueda Profundo

## NOMENCLATURA DE LAS CARACTERISTICAS FISICAS Y QUIMICAS

A	=	Arena (arenoso)
Lo	=	Limo (limoso)
Arc	=	Arcilla (arcilloso)
Fco	=	Franco (franco)
Alt	=	Altitud (altura)
Dap	=	Densidad aparente
CIC	=	Capacidad de intercambio catiónico
SMO	=	Muestras secas sin materia orgánica
MO	=	Materia orgánica
AF	=	Acidos fúlvicos
AH	=	Acidos húmicos
Fe	=	Oxidos de hierro "libres" ( $Fe_2O_3$ )
Al	=	Oxidos de aluminio "libres" ( $Al_2O_3$ )
Si	=	Oxidos de silicio "libres" ( $SiO_2$ )
Alof	=	Alofán
MA	=	Materiales amorfos
Sat. bas.	=	Saturación de bases

## 1. INTRODUCCION

Los suelos derivados de cenizas volcánicas han tenido importancia en el desarrollo agrícola, que ha sido la base del crecimiento económico de partes importantes del continente americano.

Estos suelos se encuentran ampliamente distribuidos, abarcando los sistemas montañosos que van desde el Sur de Chile hasta la Península de Alaska, incluyendo parte de las Antillas, y especialmente en aquellas zonas concurrentes al círculo de actividad volcánica circumpacífica. Existen referencias de que la mayor concentración de volcanes extinguidos y activos se encuentran en el Japón, Nueva Zelandia, Indonesia, Africa, Hawaii, Alaska, alrededor del Mar Mediterráneo, América Central y América del Sur.

Los suelos desarrollados de depósitos de cenizas volcánicas cubren áreas significativas en América Latina, principalmente en la región occidental, sosteniendo una alta densidad demográfica y dando asiento a una serie de actividades agrícolas, que permiten de manera parcial el incremento de la economía de estos países.

El carácter volcánico de muchos suelos centroamericanos ha sido reconocido por investigadores y de Costa Rica se han publicado varios trabajos que abarcan a grandes rasgos las características de las propiedades físico-químicas de estos suelos, conociéndose que el país presenta una cadena larga de volcanes cuyas continuas erupciones han depositado cantidades considerables de materiales piroclásticos que hacen posible la formación y desarrollo de "Andosoles", los cuales representan la unidad modal más característica de los suelos derivados de cenizas volcánicas.

Los andosoles o suelos ando, corresponden en el Sistema Comprensivo de Clasificación de Suelos de los EE.UU. al Gran Grupo Distrandept (anteriormente llamado Umbrandept o Normandept), incluidos entre el suborden Andept y en el orden Inceptsol; estos se consideran suelos volcánicos con cantidades variables pero en general altas de materiales amorfos y materia orgánica, cuyas propiedades específicas son altamente dependientes de los constituyentes de la fracción arcilla, los cuales condicionan y determinan la mayoría de las características y propiedades de estos suelos. Por lo tanto, parece razonable buscar el conocimiento de propiedades de cada uno de los componentes orgánicos e inorgánicos, con el propósito de hacer notar su comportamiento.

Es evidente que en los procesos de alteración que conducen a la formación de los suelos volcánicos a partir tanto de las formas vítreas como cristalinas de las rocas volcánicas, se liberan abundantes materiales amorfos\*, constituidos principalmente por alofán\*\* y óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio. Tanto estos materiales como los componentes orgánicos (fracción orgánica) tienen influencia en la capacidad de intercambio catiónico, la cual es de particular importancia, ya que controla en parte los nutrimentos disponibles para las plantas por su retención, que es esencial bajo el clima húmedo típico de una parte apreciable de

---

\* Se designa el material amorfo a la difracción de rayos X.

\*\* En este trabajo se usará el término conceptualizado por Besoain de alofán.

las regiones volcánicas de Centro América.

Es apropiado considerar que la dependencia de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de acuerdo al contenido de coloides amorfos y orgánicos, está en función de la proporción presente de éstos en el suelo, así como de su calidad o composición. Esto se debe a diferencias existentes en la CIC de las arcillas minerales y los materiales orgánicos en diversos estados de humificación, y como se ha indicado anteriormente, de que la CIC es una característica química importante para el conocimiento de la fertilidad del suelo, es necesario ampliar ideas sobre este aspecto en relación a los suelos volcánicos. Por otro lado, aunque se han realizado extensas investigaciones en la determinación de la CIC no se ha encontrado un método confiable para andosoles. Por lo tanto, es necesario continuar estudios para obtener un mejor conocimiento de la CIC y con los resultados, tratar de establecer recomendaciones aceptables para la interpretación de dicha propiedad en los suelos volcánicos.

Según lo expuesto anteriormente, y a pesar del considerable progreso alcanzado en el estudio de estos suelos, quedan aún vacíos, por lo cual es necesario darle mayor perspectiva a la presentación de este estudio y efectuar las comparaciones que permitan establecer más claramente algunas propiedades del suelo volcánico modal "andosol". Ante tal evidencia, con el presente trabajo se propone dar mayor información de los suelos ando correspondientes a diferentes elevaciones sobre el nivel del mar del macizo del Irazú en Costa Rica, a través de los siguientes objetivos:

1. Determinar la participación de los principales constituyentes de la fracción mineral (arcilla: silicatos amorfos,



sesquióxidos, etc.) y de la fracción orgánica (ácidos fúlvicos y húmicos) en la CIC.

2. Hallar la influencia del grado de desarrollo del suelo en relación con ácidos húmicos/fúlvicos en andosoles.
3. Establecer correlaciones entre la CIC, óxidos hidratados "libres", materia orgánica y grado de desarrollo de los andosoles.

## 2. REVISION DE LITERATURA

### 2.1 Suelos derivados de cenizas volcánicas (andosoles)

Los suelos derivados de cenizas volcánicas ocupan amplias extensiones en países localizados en las áreas de vulcanismo activo de los sistemas orogénicos alrededor del océano Pacífico (5, 135). Estos suelos se presentan en una serie de condiciones climáticas que van desde desérticas hasta tropicales muy húmedas y frías sub-alpinas (5, 53, 157); encontrándose en EE.UU. y países de América Latina como Argentina, Perú, Ecuador, Colombia, Chile, México, y en regiones de Las Antillas y América Central (169, 170).

En Sur América se encuentran formados dos grandes grupos: 1) Alta latitud de clima marítimo y mediterráneo; 2) Baja latitud, clima ecuatorial (170).

De acuerdo a lo señalado por Weyl (169), Centro América consta de seis grupos geológicos: Península de Yucatán, Centro América Meridional, Centro América Septentrional, la Región Volcánica de Centro América, Planicies Costeras, Tierras Bajas y Mares Epicontinentales. También señala que el vulcanismo cuaternario y reciente se halla concentrado en la zona marginal del Pacífico, donde están presentes diversos volcanes, de cuyas bases se extienden hacia las costas, llanuras aluviales formadas por material mineral de rocas piroclásticas ácidas o básicas. Se ha observado que la composición de la ceniza de volcanes de Panamá, Costa Rica y Nicaragua es considerada básica, en gran parte andesítica; siendo la ceniza de El Salvador, Honduras y Guatemala de carácter ácido (111). La mayor parte de los suelos de la Meseta Central de Costa Rica provienen

de ceniza andesítica (7, 31, 51, 83, 101, 136).

Los primeros estudios sobre suelos volcánicos fueron realizados por científicos japoneses, quienes reconocieron las propiedades particulares de estos suelos con antelación a los investigadores de otras partes del mundo (108, 157); en los años de la post-guerra, los científicos norteamericanos estuvieron en contacto con los japoneses, por lo cual se llegó a emplear por primera vez el término "Andosol" (108, 112) y su inclusión en el Sistema de Clasificación de Suelos Norteamericanos. En la Reunión de Clasificación y Correlación de Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas en Tokio (1964), se definieron como andosoles: suelos minerales en que la fracción activa es dominada por materiales amorfos, teniendo una alta capacidad de retención de agua, un horizonte A oscuro y friable con alto contenido de materia orgánica, una densidad baja y poca pegajosidad. Puede tener el horizonte B sin mostrar cantidades significativas de arcilla iluvial y ocurre bajo condiciones húmedas y semihúmedas (71, 72, 108, 129, 170).

Tan (155) define los andosoles como suelos de color negro desarrollados de cenizas volcánicas. Martini (110) dice que estos suelos son volcánicos maduros, ocurriendo en áreas de vulcanismo activo en donde erupciones periódicas contribuyen con material parental, aportando nuevas reservas de vidrios volcánicos, los cuales facilitan la formación de alofán (22, 65, 122).

Las características generales de los andosoles se pueden resumir en: contenido alto de materia orgánica; pH de ácido a moderadamente ácido; alta permeabilidad (67, 160); capacidad de cambio catiónico alta y

capacidad de intercambio aniónica relativamente elevada (71, 91, 111); dispersión difícil; retención de humedad por encima del 20 por ciento a 15 atmósferas; baja saturación de base (91); suelo profundo entre 50 y 100 o más centímetros de profundidad, con estratificación formada por la sedimentación; la densidad de partículas es normalmente entre los valores 2,7 a 2,9 g/ml debido al alto porcentaje de óxidos de hierro (67), reduciéndose cuando hay alto contenido de materia orgánica (22, 170); la densidad aparente oscila entre 0,45 a 0,75 g/ml; la porosidad es alta; alta conductividad hidráulica (22, 67, 170); la arcilla dominante es el alofán y presenta una elevada proporción de alúmina de intercambio (14, 16, 17).

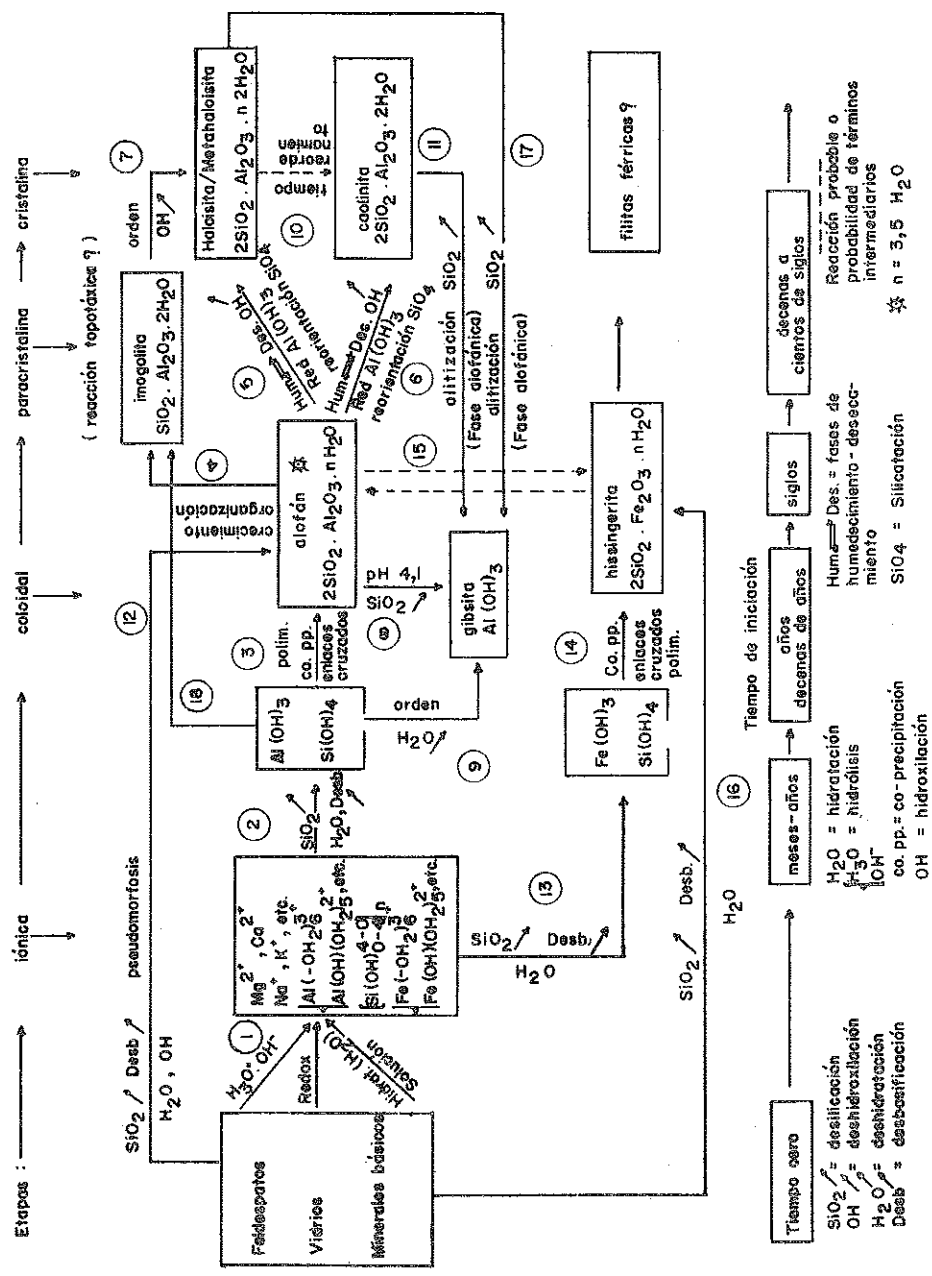
Por la importancia que han adquirido estos suelos en el potencial agrícola-ganadero, se han realizado varios congresos internacionales para evaluarlos y buscar metas con respecto a ellos (108, 147).

Besoain (12) propone una secuencia de meteorización de las cenizas volcánicas de acuerdo a la Figura 1, con lo cual explica las probables reacciones y productos que se forman durante la degradación de estas cenizas en ambientes de humedad y drenaje adecuados; partiendo de un material originario formado de feldespatos, vidrios y minerales básicos es posible seguir los siguientes pasos para llegar a materiales organizados (cristalinos).

Fases principales del proceso:

1. Por los procesos de hidrólisis, reducción, hidratación e influencia de soluciones darán como resultado una serie de complejos e iones, siendo ésta una etapa iónica que

Fig. 1.- Esquema de las reacciones probables y productos que se forman durante la metaformización de las cenizas volcánicas en ambientes de humedad y drenaje adecuados. \*



\* Esquema propuesto por el Dr. BESOAIN. (En prensa)

puede ocurrir en un tiempo de meses.

2. El producto de la primera fase (complejos e iones) por eliminación de  $\text{SiO}_2$  (desilicación), descomposición de las sales con  $\text{H}_2\text{O}$  (hidratación) y pérdidas de bases (desbasificación) se puede formar  $\text{Al}(\text{OH})_3$  y  $\text{Si}(\text{OH})_4$ . Esta se considera una etapa intermedia entre la iónica y la coloidal, y se realizará en un tiempo que fluctúa entre meses y años.
3. Los óxidos hidratados debido a la polimerización, la precipitación y la presencia de enlaces cruzados dan como producto el alofán; esto sucede a través de decenas de años y es una etapa coloidal.
4. El alofán por crecimiento y organización de su estructura forma imogolita, siendo ésta una etapa paracrística y el proceso tiene una duración de siglos.
5. El alofán a causa de las fases de humedecimiento-desecamiento, deshidroxilación (pérdida de  $\text{OH}^-$ ), transformación de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  y la reorientación estructural de  $\text{SiO}_4$  puede dar como producto haloisita/metahaloisita, realizándose éste en un tiempo de decenas a cientos de siglos y reconocida como una etapa cristalina.
6. Al ocurrir los mismos fenómenos de la reacción 5, el alofán puede transformarse en caolinita.
7. La imogolita por el ordenamiento estructural y pérdida de  $\text{OH}^-$  originará la haloisita/metahaloisita.

8. El alofán a un pH 4,1 y por pérdida de  $\text{SiO}_2$  puede formar gibbsita.
9. Los óxidos hidratados de Al y Si por ordenamiento estructural y pérdida de  $\text{H}_2\text{O}$  permiten obtener gibbsita a partir de los óxidos de Al presentes.
10. La haloisita/metahaloisita posiblemente a través del tiempo por reorganización de su estructura se transforma en caolinita.
11. La caolinita por el lavaje intenso del  $\text{SiO}_2$  que deja las capas octaédricas de aluminio libres o independientes (alutización) y por pérdida de  $\text{SiO}_2$  dará gibbsita, considerándose este proceso una fase alofánica.
12. El material original por pérdida de  $\text{SiO}_2$ , pérdida de bases, hidratación e hidroxilación en un proceso de pseudomorfosis produce el alofán, siendo necesario decenas de años y realizándose etapas iónica-coloidal.
13. Los complejos e iones por la pérdida de  $\text{SiO}_2$ , pérdida de bases e hidratación darán óxidos hidratados de Fe y Si.
14. Los óxidos hidratados por coprecipitación y enlaces cruzados polimerizados pueden originar la hissingierita.
15. Posiblemente a través de reacciones reversibles del alofán y la hissingierita, podría resultar el producto de uno con respecto al otro.

16. El material original por pérdida de  $\text{SiO}_2$ , pérdida de bases e hidratación puede producir la hissingerita.
17. La haloisita/metahaloisita por el fenómeno de alitización y por pérdida de  $\text{SiO}_2$  puede formar gibbsita y se considera una fase alofánica.
18. Los óxidos hidratados de Al y Si pueden transformarse en una imogolita a través de decenas de años.  
La hissingerita a través de cientos de siglos puede llegar a formar filosilicatos.

## 2.2 Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

La capacidad de intercambio catiónico del suelo, se considera como la resultante de las cargas negativas de los minerales arcillosos cristalinos y de aluminosilicatos amorfos, generalmente conocidos como alofán, y de grupos funcionales de los coloides orgánicos (142).

Las condiciones de la distribución de cationes que rodean el complejo de intercambio catiónico, la presencia de bases o aluminio cambiante que afecta el por ciento de saturación de los coloides y el pH del sistema, tienen igualmente una gran importancia sobre el fenómeno del movimiento de nutrimentos (45, 136).

Con relación a la CIC, se puede señalar que es alta en los andosoles (16, 71, 72, 106), debido al contenido de humus y el alofán que tienen influencia sobre la CIC (102, 111) y a veces por las arcillas del tipo 2:1 (16, 17, 71, 108, 111). En México (4) se han obtenido valores de CIC entre 15 y 60 meq/100 g de suelo y de Centroamérica se reportan valores que oscilan entre 11,5 y 45,2 meq/100 g de suelo (120).



Wright (170) presenta valores moderados (20-40 meq/100 g de suelo) y altos (78 meq/100 g de suelo) de andosoles de Suramérica. Tan (155) en Indonesia de acuerdo a la CIC ha efectuado la clasificación de los andosoles.

Según Birrell (21, 22) y Frink (70) el método común de intercambio directo para determinar la CIC puede estar sujeto a errores cuando se analizan suelos con materiales amorfos, por lo cual, la CIC más aceptable para andosoles es la determinada por la suma de las bases intercambiables, hidrógeno y aluminio (154). No obstante, Harada y Wada (82) no están de acuerdo con esta determinación de la CIC, debido a que los suelos alofánicos se encuentran variando sus cargas positivas y negativas, y puede manifestarse error en el análisis, principalmente cuando los suelos desarrollan cargas positivas en cantidades comparables a o más altas que aquellas de carga negativa.

Kanehiro y Sherman (96) y Schalscha (144) señalan que en algunos suelos de Hawai y de Chile con alto contenido de material amorfo, la CIC disminuye al secarse cuando se emplearon diferentes temperaturas y no se recupera al humedecerse (el proceso no es reversible), explicando que esto ocurre a consecuencia de la cristalización de elementos de la fracción amorfa o por la contracción que reduce la superficie de contacto (146).

Harada y Wada, citados por Sadzawka (140) en trabajo reciente, utilizaron diferentes temperaturas en suelos de Japón, demostrando que la CIC se incrementa con el secado de los suelos alofánicos, y que esto depende de la composición química del alofán. Sadzawka (140) expone que este fenómeno es atribuido a la disminución de la carga

positiva en la superficie del suelo al acelerarse la descomposición de la materia orgánica y fortalecer los grupos ácidos del alofán.

Birrell (20) encontró que la CIC en suelos alofánicos, analizada por lixiviación, depende del tamaño efectivo de los cationes empleados, de la concentración de la solución lixiviada, y de la concentración y el volumen del alcohol empleado para el lavado. En presencia del alofán se han determinado diferencias resultantes entre valores de la CIC, que se le atribuye al alto grado de hidrólisis de los cationes cambiables durante el proceso de lavado por alcohol acuoso (17, 21).

Wada y Harada (166) indican que en suelo alofánico, estudiando la concentración y tipo de catión para medir la CIC, vieron que los cationes K, Na y  $\text{NH}_4$  dieron los resultados más altos.

Helling y colaboradores (87), investigaron la contribución de la materia orgánica y de los minerales arcillosos en relación con el pH de las soluciones saturadoras, y constataron que la CIC cambió en forma altamente significativa al aumentar el pH, debiéndose esto a la presencia de alofán y de la materia orgánica.

Para determinar la CIC en suelos ácidos se ha empleado con frecuencia la saturación del complejo de cambio en acetato de amonio ( $\text{NH}_4\text{OAc}$ ) y lavaje del exceso de sal con etanol (34, 71). Debido a la adsorción del acetato, diversos tipos de suelos retenían cantidades significativas de sal, aún después de varios lavados con metanol, obteniendo así información con serios errores por exceso (134).

Pasluk y Carson (126) determinaron que para acidez cambiante, el método de  $\text{BaCl}_2$ -TEA pH 8,1 extrae cantidades más altas que el acetato

de amonio ( $\text{NH}_4\text{OAc}$ ). Este último es frecuentemente el método más usado para bases cambiables (28, 29, 118, 120, 127, 129, 136, 168).

En estudios comparativos entre las arcillas y resinas de intercambio (poseen propiedades físico-químicas similares a las arcillas pero sin tener propiedades complejas como ellas), se han observado que el Al es el catión predominante en suelos ácidos (27, 40). En otros estudios (36, 52, 84, 86, 125, 137, 143) se han empleado las resinas de intercambio para analizar la CIC y capacidad de intercambio aniónico en relación con fenómenos físico-químicos en suelos.

Fuentes (71) en trabajo reciente, recomienda el método de la  $\text{Ca}(\text{OAc})_2$  para determinar la CIC a pH diferente al del suelo y el método de resina de intercambio para la obtención de CIC a pH del suelo.

### 2.3 Fracciones de la materia orgánica

A pesar de la gran significación e importancia de la fracción orgánica en las características de los andosoles, aún no ha podido explicarse satisfactoriamente algunas de sus propiedades más específicas, como la naturaleza de la fracción humificada y la estabilidad de los compuestos húmicos (58).

De acuerdo a Goh (75), los ácidos húmicos y fúlvicos son las fracciones más importantes de las sustancias húmicas y además constituyen la parte activa de la materia orgánica del suelo (131).

Tokudome y Kanno (159, 160), determinaron que los suelos alofánico-húmicos jóvenes tienen mayor cantidad de carbono, y relativamente superior contenido de ácidos fúlvicos que los suelos alofánico-húmicos más desarrollados, que reflejan una condensación de los ácidos húmicos.

Birrell (22) sugiere que con el grado de desarrollo de la parte superficial del suelo aumenta la relación ácidos húmicos/ácidos fúlvicos, lo cual permite la formación de andosoles con alto porcentaje de aluminio; esto es obvio, ya que los suelos de cenizas volcánicas tienen con frecuencia mucha alumina extraíble (17, 103), además de facilitar los ácidos fúlvicos la lixiviación del aluminio en lugar del hierro (22, 111).

Costa y colaboradores (44) trabajando en las fracciones de la materia orgánica, hallaron que la fracción más eficaz para retardar el movimiento del hierro eran los ácidos húmicos.

Swindale (153) anota que los suelos volcánicos contienen alto porcentaje de materia orgánica, debiéndose en parte a la buena fertilidad y alta capacidad de retención de agua de estos suelos que producen buen crecimiento vegetativo. El clima húmedo templado, bajo el cual abundan los andosoles y que resulta en una descomposición lenta (111), ayuda a la vez a la formación de compuestos húmicos (58). Kanno (97) ha atribuido la estabilidad de los compuestos húmicos a la formación de complejos muy estables entre los ácidos húmicos y ácidos fúlvicos con el aluminio y alofán del suelo. Este fenómeno podría ser responsable de las grandes acumulaciones de materia orgánica en estos suelos (58).

La estabilidad de la materia orgánica en algunos suelos volcánicos de Nueva Zelanda está asociada a la presencia de materiales amor<sub>u</sub>fos y es atribuida por algunos trabajos (77, 90) a la formación de complejos entre la materia orgánica y coloides amorfos. Otros científicos (17, 37, 66, 78) confieren este fenómeno a la adsorción del aluminio por la superficie de las partículas de la materia orgánica.

Algunos investigadores han establecido valores característicos de materia orgánica en suelos de regiones volcánicas (30, 58) y hasta se basan en la relación entre ácidos húmicos/ácidos fúlvicos como criterio de clasificación de suelos (155). En Japón (1, 2, 93) e Indonesia (155) se han encontrado relaciones de ácidos húmicos/ácidos fúlvicos en suelos volcánicos próximos o menores a uno.

Según Martini (111) en los regosoles volcánicos ligeramente meteorizados, con poco alofán, el contenido de humus es relativamente bajo; en los andosoles moderadamente meteorizados y altos en alofán, el nivel de humus es máximo; en los suelos volcánicos viejos, bajos en alofán y altos en minerales de arcilla cristalina es menor el contenido de humus.

#### 2.4 Oxidos hidratados "libres" de Fe y Al

Con la alteración de las rocas volcánicas, mediante los procesos edafológicos que conducen a la formación del suelo, se originan una serie de productos que son de primordial importancia para el estudio y conocimiento en las fases de formación del suelo. Tanto las formas vítreas como cristalinas de los materiales volcánicos liberan compuestos amorfos, constituídos por alofán y óxidos e hidróxidos de Fe y Al (58, 138).

Yoshinaga (173) encontró que los sesquióxidos\* se encuentran ligados fuertemente al alofán (55, 108), teniendo gran importancia en la

---

\* Oxidos hidratados "libres".

formación de algunos suelos volcánicos (16, 111).

Bornemisza e Igue (29), en un estudio relacionado con sesquióxidos en suelos tropicales, en los cuales se incluían andosoles, señalan que estos materiales son una fracción necesaria en estos suelos, encontrándose de que la liberación de sesquióxidos es alta en relación con otros suelos (138).

Algunos investigadores (5, 16, 94, 154) consideran que los andosoles se caracterizan por tener en la fracción activa un porcentaje alto de materiales amorfos tipo alofánico y óxidos hidratados de Fe y Al, encontrándose en suelos con alto contenido de alofán la presencia de hierro y aluminio (143). Además, puede señalarse que los sesquióxidos tienen cierta influencia en la CIC (17).

Martini (111) halló que en andosoles el contenido de Al disminuye con la profundidad, ocurriendo lo contrario con los suelos volcánicos viejos; observando también que la cantidad de Fe es menor en los andosoles que en los volcánicos viejos (107).

En Nueva Zelanda (60) informan que los suelos derivados de vidrios volcánicos básicos contienen un porcentaje alto de alofán y sesquióxidos, demostrando que la meteorización del vidrio, produce en un comienzo constituyentes amorfos. Esto es confirmado por un trabajo de Calhoun y colaboradores (39) en suelos colombianos.

En Japón (159), en estudios referentes a la naturaleza del humus en suelos volcánicos, obtuvieron resultados que indicaron que la mayor parte del humus estaba unida al alofán y sesquióxidos.

Para la extracción de Fe y Al se debe tomar en consideración

el método de extracción y el pH de la solución extractora, que son ambos factores los que afectan el Fe y Al removidos (174).

## 2.5 El alofán

El alofán es la arcilla predominante en suelos derivados de cenizas volcánicas en las zonas tropicales (55, 153, 156, 170), y que son denominados andosoles (4, 16, 53, 72, 112, 124), según la nomenclatura de FAO.

El término alofán, actualmente no está bien definido, pues mientras que la mayoría de los autores lo define como cualquier mineral amorfo a los rayos X (170, 171), otros lo consideran como un mineral secundario coloidal hidratado, amorfo a los rayos X, con una relación sílice/alúmina de 1 a 2 y con una gran superficie activa (154), aunque se cree que existe más de una forma (61) y en la etapa posterior de meteorización desarrolla una estructura para formar haloisita, gibbsita y caolinita (63, 116), bajo condiciones de sequedad o humedad (22).

A pesar de esto, algunos investigadores han realizado recopilaciones de trabajos para dar un concepto sobre el alofán (116) definiéndolo como un material amorfo, constituido predominantemente de sílice, aluminio y agua, cuya presencia no está unida necesariamente a material volcánico reciente, ya que se ha encontrado en sedimentos del pleistoceno, en latosoles y en suelos hidrotermales. Otros autores (22, 60) consideran que la formación de alofán se efectúa a partir de la co-precipitación de solución o gel que contengan alta proporción de sílice y alúmina liberado de los minerales primarios. Yoshinaga (172) señala que la composición química del alofán es de 31-40 por ciento

de óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), 35-42 por ciento de óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y 15 al 19 por ciento de agua, correspondiendo aproximadamente al 93 por ciento del material total y estando en menor proporción el Na, Fe, Ti; el mismo autor explica que es difícil obtener en "forma pura" el alofán por estar presente impurezas de sesquióxidos libres y minerales cristalinos.

Besoain (17) define el alofán como un término general de un aluminosilicato no cristalino o poco cristalino, pero más ordenado que un vidrio, altamente hidratado, amorfo a los rayos X, con diferencia de composición química y un rango de término orden/desorden, pero formado básicamente por alúmina, sílice y agua, con una razón molecular  $\text{SiO}_2$ :  $\text{Al}_2\text{O}_3$  variable entre 0,5-2,0.

Egawa (55) indica que las características del alofán son variables, dependiendo de otros minerales, específicamente de minerales de arcilla. Según Yoshinaga y Aomine (171), el alofán tiende a variar de una muestra a otra de acuerdo al grado de su meteorización.

En la determinación del contenido de alofán en los suelos, según De Villiers (49), se han usado varios procedimientos que hasta el presente no han resultado completamente satisfactorios para este problema, el cual se debe a: 1) por no tener un concepto definido del término alofán, y 2) por el grado empírico en el procedimiento analítico al relacionarlo con otro material. Además, en el análisis se debe eliminar la materia orgánica (19, 92, 104, 123, 159, 165) para poder obtener un valor real del alofán, aunque se debe destacar que no se puede conseguir en forma pura por encontrarse acompañado de impurezas



como sesquióxidos libres y minerales cristalinos (49, 129).

En acuerdo con algunos autores, el alofán se encuentra en dos formas: una denominada "Alofán estable" que es poco soluble en ácidos y bases diluídas (92), y otra caracterizada como "Alofán inestable" soluble en ácidos y álcalis diluídos (128).

Un procedimiento para determinar el alofán es a través del valor delta de la capacidad de intercambio catiónico, propuesto por Aomine y Jackson (9) y que se refiere al incremento de la CIC al aumentar el pH en grupos de suelos alofánicos y en muestras de alofán estándar de Ross y Kerr (139). Dicho método sirve para la determinación semicuantitativa de esta arcilla, ya que la precisión del método no es enteramente confiable. En experimentos realizados por estos autores (9) se obtuvieron cifras mayores en las muestras tratadas en medios alcalinos en comparación con las otras. Con este método del valor delta se han obtenido valores más altos en la parte superficial del suelo que en capas más profundas (80, 106).

En algunos estudios se informa sobre determinaciones de alofán no soluble (valor delta) y alofán soluble, siendo encontrado el primero al tratarse la muestra con carbonato de sodio al 2 por ciento y una solución buffer de acetato a pH 3,5 (106, 124). En cuanto al alofán soluble se agrega acetato de sodio normal y agua oxigenada al 35 por ciento a una muestra y otra se trata con citrato de sodio, bicarbonato de sodio y ditonito de sodio; por diferencia se obtiene el valor del alofán soluble (106, 124). Este análisis puede considerarse aceptable para la determinación del contenido de alofán y los resultados se encuentran

Íntimamente relacionados con la cantidad de materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico (19, 63, 92).

Palencia (124), en estudios realizados con suelos de diversos países con el mismo método, encontró que al incrementarse el contenido y la meteorización de las cenizas, es mayor la cantidad de alofán presente.

Un método cualitativo es el de Fieldes y Perrot (63) basado en tratar la muestra con NaF 1M que resulta en un incremento del pH entre 9,5 y 10,4, dos minutos después de aplicado el tratamiento, señalando la fracción activa del alofán. Por ser ésta una prueba rápida, se emplea con frecuencia en el campo (57).

La metodología antes descrita ha sido empleada por algunos investigadores (57, 124), obteniéndose resultados más fehacientes en el laboratorio (63, 124), aunque los porcentajes son proporcionales en ambos sitios en relación con la profundidad del suelo (63).

La disolución selectiva es una técnica ya utilizada en 1851 por Salvetat, citado por Mitchell y colaboradores (116) para extraer sílice libre, y en forma general se puede decir que se han empleado reactivos alcalinos para disolver el material amorfo del suelo (116); el material amorfo comprende alofán, parte de óxido e hidróxido de hierro y aluminio, óxido de silicio libre, manganeso, tantalio y geles de estos elementos (146).

Hashimoto y Jackson (85) trabajaron con este método en arcillas, empleando una solución de NaOH 0,5N calentando durante 2,5 minutos, obteniendo extracciones adecuadas de alofán, sílice libre y

aluminio libre, empleándose para la extracción de hierro libre el método de ditionitocitrato-bicarbonato sódico (113). Los primeros autores mencionados (116) fueron capaces de encontrar valores aceptables de alofán, gibbsita, sílice amorfa, alúmina, caolinita y haloisita. Otros científicos (115, 145, 148, 168) han detectado cantidades significativas con dicho método en suelos de varios países.

Este análisis ha sido aplicado en suelos de Nueva Zelandia (116), en las Antillas (43), Japón y Australia (167), regiones intertropicales y mediterráneas (145).

## 2.6 Espectrofotometría infrarroja

La espectrofotometría infrarroja es empleada en suelos desde hace aproximadamente dos décadas (54, 89, 119), siendo estudiado inicialmente el alofán por Adler, citado por Besoain (17) y posteriormente fue analizado en cenizas volcánicas por Fieldes (61, 62), Kanno y colaboradores (98), Yoshinaga y Aomine (171), Miyauchi y Aomine (117), Besoain y colaboradores (15), Mejía y colaboradores (114), Calhoun y Carlisle (38), Kitagawa y colaboradores (100), Frederickson (69) y Colmet-Daage y colaboradores (42).

Los espectros de absorción infrarroja para el alofán registran tres bandas características: una banda ancha entre  $800-1300\text{ cm}^{-1}$  con máxima alrededor de  $1000\text{ cm}^{-1}$  revela vibraciones de grupos hidróxidos (SiOH y AlOH); otra banda alrededor de  $1620-1650\text{ cm}^{-1}$  se debe a deformación angular de H-O-H y una última banda ancha entre  $3200-3700\text{ cm}^{-1}$  con máxima alrededor de  $3450\text{ cm}^{-1}$  indica vibración de grupos OH libres y estructurales (15, 17, 38, 42, 62, 100, 114).

Fieldes y colaboradores (62) encontraron en la banda de  $1000\text{ cm}^{-1}$  diferencia entre el alofán B (fase discreta de sílice y alúmina en forma desordenada) y el alofán A (fase no discreta, con cierta ordenación y tendiendo a caolinita), consiste de una banda a  $950\text{ cm}^{-1}$  para el alofán B y una banda superior a  $1000\text{ cm}^{-1}$  para el alofán A; esto ha sido confirmado por otros autores (15, 42, 116), demostrando que la banda de  $\text{SiO}_2$  tiende a las bajas frecuencias entre 900-1100 cuando disminuye la cristalinidad.

Los diagramas de espectrofotometría infrarroja pueden exhibir una banda de  $800\text{ cm}^{-1}$  debido a la presencia de sílice amorfa (61, 64). Otros investigadores (17, 117) la atribuyen a la  $\alpha$ -cristobalita o puede haberse confundido con la banda de  $795\text{ cm}^{-1}$  correspondiente a cuarzo (17, 38, 62).

La banda a  $1400\text{ cm}^{-1}$  posiblemente se considera hissingerita, atribuída a un silicato amorfo de hierro (13, 48, 76, 98).

### 3. MATERIALES Y METODOS

#### 3.1 Suelos estudiados

Para el presente trabajo se eligieron muestras del área correspondiente a la influencia del Volcán Irazú en donde se escogieron los sitios de muestreo a diferentes altitudes entre 1200 y 2400 msnm, de conformación topográfica muy similar (puntos altos o puntos bajos), justamente a través de toda la zona en que predomina el material de este volcán y comprenden los siguientes puntos: Rancho Redondo, Durazno, Sanatorio Durán, Pavas, Cot, La Chinchillo, Coronado, y La Rueda, siendo representativos del tipo de suelo en el sector de estudio. Se encuentran ubicadas al oeste del volcán en el área donde los vientos predominantes depositan las cenizas de las erupciones.

Las muestras se extrajeron de dos profundidades que correspondieron a la capa de influencia reciente y a la capa inmediatamente inferior; se midió su espesor, para luego tomar una cantidad indicadora en cada horizonte, las que fueron estudiadas secas al aire, a humedad de campo y secas al aire eliminando la materia orgánica, siendo trituradas, tamizadas (2 mm) y homogenizadas, y posteriormente analizadas individualmente en forma duplicada.

Los suelos de este volcán se consideran procedentes de materiales piroclásticos en diferentes estados de meteorización, arrastrado y de deposiciones de cenizas volcánicas, con una formación geológica reciente y de composiciones volcánicas del cuaternario, teniendo un gran espesor que a veces llega a sobrepasar los 10 m de profundidad,

típico de montaña, sin piedras, moteados y concreciones, ausencia de erosión (51, 109).

Las características climáticas de los suelos estudiados se encuentran señalados en el Cuadro 1.

La Figura 2 ilustra la región e indica el sitio preciso de la toma de cada muestra.

### 3.1.1 Descripción de los suelos

#### 3.1.1.1 Rancho Redondo

Son suelos franco-arenosos, formados a partir de un manto de cenizas volcánicas, producto de diversas épocas de actividad del Volcán Irazú. Estas cenizas han sido transportadas por el viento y depositadas principalmente en un área en forma de abanico y su influencia ha sido enmarcada por la acción conjunta de materiales de otra procedencia (51).

Las extracciones se hicieron alrededor de 2000 metros sobre el nivel del mar y en dirección suroeste del Irazú.

La topografía se encuentra entre los 16 y 45 por ciento de pendiente, encontrándose áreas de acúmulo, planas o suavemente inclinadas que forman extensiones pequeñas.

Estos suelos son profundos, permeables, sin estructura definida, pudiendo considerarse un edafoide\* (163) en su parte superficial,

---

\* Edafoide: es un cuerpo natural que se asemeja a un suelo, cuyo material ha sufrido escasa influencia del proceso edafogenético.

Cuadro 1. Características climáticas de los sitios correspondientes a los suelos estudiados.

M U E S T R A S	Alti- tud (msnm)	Vegetación (Especie)	Zona de Vida (Clasifi- cación)	Peci- pitación Media anual <sup>2</sup> (mm)	Temperatura anual <sup>2</sup> (°C)		Pro- medio	Estación	Alti- tud (msnm)	Lati- tud Norte	Longi- tud Oeste
					Mín.	Máx.					
RR <sub>1</sub>	2,000	Gramíneas	BMHM	2548,1	9,4	25,7	17,55	Rancho Redondo	1780	09°57'	83°56'
RR <sub>2</sub>	2,000	"	BMHM	2548,1	9,4	25,7	17,55	"	1780	09°57'	83°56'
D <sub>1</sub>	1,600	"	BMHM	2548,1	9,4	25,7	17,55	"	1780	09°57'	83°56'
D <sub>2</sub>	1,600	"	BMHM	2548,1	9,4	25,7	17,55	"	1780	09°57'	83°56'
SD <sub>1</sub>	2,400	"	BMHM	2159,8	6,4	22,0	14,30	Sanatorio Durán	2337	09°56'	83°52'
SD <sub>2</sub>	2,400	"	BMHM	2159,8	6,4	22,0	14,30	"	2337	09°56'	83°52'
P <sub>1</sub>	2,400	"	BMHM	2159,8	6,4	22,0	14,30	"	2337	09°56'	83°52'
P <sub>2</sub>	2,400	"	BMHM	2159,8	6,4	22,0	14,30	"	2337	09°56'	83°52'
Ct <sub>1</sub>	2,000	"	BHMB	2159,8	6,4	22,0	14,30	"	2337	09°56'	83°56'
Ct <sub>2</sub>	2,000	"	BHMB	2159,8	6,4	22,0	14,30	"	2337	09°56'	83°56'
CH <sub>1</sub>	1,600	"	BHMB	2159,8	6,4	22,0	14,30	"	2337	09°56'	83°56'
CH <sub>2</sub>	1,600	"	BHMB	2159,8	6,4	22,0	14,30	"	2337	09°56'	83°56'
Cd <sub>1</sub>	1,200	"	BHMB	2275,7	11,5	26,6	19,05	San Isidro	1382	09°59'	84°00'
Cd <sub>2</sub>	1,200	"	BHMB	2275,7	11,5	26,6	19,05	Coronado	1382	09°59'	84°00'
LR <sub>1</sub>	1,200	"	BHP	1478,4	9,3	28,6	18,95	El Guarco	1433	09°50'	83°57'
LR <sub>2</sub>	1,200	"	BHP	1478,4	9,3	28,6	18,95	"	1433	09°50'	83°57'

<sup>1</sup> Holdridge, L.R. (88)

<sup>2</sup> Vives, L. (162)

BMHM = Bosque muy húmedo montano  
 BHMB = Bosque húmedo montano bajo  
 BHP = Bosque húmedo premontano





con presencia de macroporos y abundancia de raíces.

De 0-15 cm, negro (10YR 2/1) en húmedo, gris muy oscuro (10YR 3/1) en seco, areno-franco. No plástico, no adhesivo, suave, muy friable, buena penetración de raíces, buen drenaje, escaso contenido de materia orgánica, ácido a moderadamente ácido, pH de 6,50 en agua, de 5,88 en KCl y de 5,15 en CaCl<sub>2</sub>.

Entre 15-55 cm, pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo, pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) en seco, franco-arenoso. No adhesivo y ligeramente plástico en húmedo, buena penetración de raíces, bajo contenido de materia orgánica, ácido a moderadamente ácido, pH 6,15 en agua, de 5,00 en KCl y en CaCl<sub>2</sub> de 5,10.

#### 3.1.1.2 Durazno

Estos suelos se pueden considerar con similares características a los suelos de Rancho Redondo, diferenciándose por encontrarse en un estado más avanzado de desarrollo. Se encuentra a una altura aproximada de 1600 msnm y en dirección suroeste del volcán.

Son suelos de buen drenaje, de topografía ondulada y subsuelo con cierta cantidad de arena, predominando los materiales de cenizas y arenas recientes acarreadas de la falda del Irazú (109). Posiblemente la capa superficial puede catalogarse como un edafoide (163).

De 0-10 cm, negro (10YR 2/1) en húmedo, gris oscuro (10YR 4/1) en seco, areno-francoso, terrenoso débil, suave, muy friable, no plástico, ligeramente adhesivo, buena penetración de raíces, buen drenaje. Bajo contenido de materia orgánica. Presencia de raíces, ácido a moderadamente ácido, pH de 6,35 en agua, 5,48 en KCl y 5,57 en CaCl<sub>2</sub>.

Entre 10-50 cm, pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo, pardo oscuro (10YR 4/3) en seco, areno-francoso. Poco adhesivo, no plástico, buen drenaje, regular penetración de raíces; regular contenido de materia orgánica. Presencia de raíces. Acido a moderadamente ácido, pH en agua de 5,75, en KCl de 4,75 y en  $\text{CaCl}_2$  de 4,75.

### 3.1.1.3 Sanatorio Durán

Son suelos profundos, livianos, muy porosos, de estructura no definida, por lo cual se podría considerar como un edafoide (163) en el horizonte superficial, pudiendo variar de terreno débil a granular; el espesor de la capa arable varía desde unos pocos centímetros hasta 50 cm, dependiendo del espesor de la capa de cenizas volcánicas depositadas en el material presente anteriormente (109). Se caracteriza por tener buen drenaje, buen contenido de materia orgánica. La acidez es de fuerte a ligeramente ácida. Presencia de raíces hasta los 60 cm y buena actividad microbiana. Aproximadamente a 2400 msnm y en dirección suroeste del volcán.

De 0-20 cm, negro (10YR 2/1) en húmedo, gris muy oscuro (10YR 3/1) en seco, areno-francoso. No adhesivo, no plástico, buen drenaje, muy friable, buena penetración de raíces. Bajo contenido de materia orgánica. Presencia de raíces y actividad microbiana alta. Acido a moderadamente ácido, poseyendo pH de 6,05 en agua, 5,00 en KCl y 4,80 en  $\text{CaCl}_2$ .

Entre 20-60 cm, negro (10YR 2/1) en húmedo, pardo oscuro (10YR 4/3) en seco, franco-arenoso. No plástico y ligeramente adhesivo, buena penetración de raíces, estructura terrena débil. Regular

contenido de materia orgánica. Presencia de raíces finas, ácido a moderadamente ácido, pH de 5,60 en agua, de 4,90 en KCl y de 4,87 en  $\text{CaCl}_2$ .

#### 3.1.1.4 Pavas

El material es una masa arenácea-conglomerática, con nódulos de aglomerado y con influencia en algunos puntos de materiales caídos de las partes altas, constituyendo un compuesto heterogéneo, dominando la arenisca en estos suelos. La capa superficial se puede conceptualizar como un edafoide (163) por su estructura no definida. A una altitud alrededor de 2400 msnm y en dirección oeste del volcán.

De 0-20 cm, pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo, pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en seco, areno-francoso. No adhesivo, no plástico, muy poroso, muy friable, estructura débil, buena penetración de raíces. Regular contenido de materia orgánica, ácido a moderadamente ácido el pH en agua de 6,45, en KCl de 5,25, en  $\text{CaCl}_2$  de 5,17.

Entre 20-60 cm, pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo, pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) en seco, franco-arenoso. No plástico, no adhesivo, sin estructura aparente, buena penetración de raíces, buen drenaje. Escasa materia orgánica, ácido a moderadamente ácido. Su pH en agua de 6,58, en KCl de 5,60 y en  $\text{CaCl}_2$  de 5,52.

#### 3.1.1.5 Cot

Estos suelos son típicos de montaña, con topografía ondulada, profundos, buen drenaje, con buen contenido de materia orgánica, con ausencia de piedras y concreciones (72). Se observa la

distribución de raíces hasta los 60 cm en una forma normal. La acidez varía de fuerte a moderadamente ácida. Presencia de cenizas volcánicas recientes. Su altura está cerca de 2000 msnm y en dirección suroeste del Irazú.

De 0-20 cm, pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo, pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) en seco, franco-arcilloso. Estructura granular, friable, ligeramente adhesivo y plástico, buen drenaje, buena penetración de raíces. Alto contenido de materia orgánica. Presencia de raíces finas y actividad biológica alta. Acido a moderadamente ácido. Tiene un pH de 6,15 en agua, 5,40 en KCl y 5,65 en  $\text{CaCl}_2$ .

Entre 20-50 cm, pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo, pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) en seco, franco-limoso. Plástico y ligeramente adhesivo, duro en seco, firme en húmedo. Moderado drenaje. Mediano contenido de materia orgánica. Presencia de raíces y concreciones de hierro. Acido a moderadamente ácido, constatándose un pH de 6,35 en agua, 5,40 en KCl y 5,55 en  $\text{CaCl}_2$ .

### 3.1.1.6 La Chinchilla

Descrito por Dondoli y Torres (51), quienes señalan que el material matriz está constituido por una masa aglomerática de piezas de todo tamaño, redondeadas y angulares, revueltas con material arcilloso, caolinítico, altamente ferruginoso (109). Se hallan a una altura alrededor de 1600 msnm y en dirección suroeste del volcán.

La topografía es ondulada; se caracteriza por lo degradado del suelo, lo altamente meteorizado de su subsuelo y el material matriz; su pedregosidad superficial y su color amarillento rojizo dominante.

Algunos puntos han sido cubiertos por materiales de arrastre posteriores con influencia de cenizas volcánicas recientes.

Estos suelos presentan un alto contenido de separados finos (arcilla) que en algunos casos alcanza hasta 75 y 80 por ciento con predominio de coloides ferruginosos (arcilla de hidróxido).

Entre 0-20 cm, pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo, pardo oscuro (10YR 4/3) en seco, franco-arcilloso, estructura subangular. Plástico y adhesivo en húmedo y duro en seco, mediano contenido de materia orgánica, presencia de raíces y concreciones de hierro, pedregoso y abundante de grava. Acido a moderadamente ácido. El pH en agua de 6,00, en KCl de 4,95 y en  $\text{CaCl}_2$  de 5,10.

Entre 20-50 cm, pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo, pardo oscuro (10YR 4/3) en seco, franco-arcilloso-limoso, estructura terrosa media. Plástico y muy adhesivo en húmedo, muy duro en seco, bajo contenido de materia orgánica. Presencia de raíces finas y porciones de roca meteorizada, con residuos ferruginosos. Acido a moderadamente ácido, poseyendo pH de 5,45 en agua, 4,30 en KCl y 5,10 en  $\text{CaCl}_2$ .

#### 3.1.1.7 Coronado

Descrito por Vargas y Torres (161), el suelo se desarrolló a partir de depositación de materiales piroclásticos (cenizas), teniendo perfiles hasta de 10 m de profundidad. Se caracteriza por ser friable, con gran capacidad de retención de agua, considerándose relativamente joven con buen drenaje interno y superficial. En algunos casos se observan dos capas hasta de dos metros (la primera y la segunda), no existiendo la capa compactada (109); en ciertos lugares

se observan capas de iguales características en color y textura que funcionan como suelos, lo cual puede deberse a un proceso de formación interrumpido por la caída de nuevo material de igual origen que sepultó al anterior (109). Las muestras seleccionadas se encuentran aproximadamente a 1200 msnm y en dirección oeste del Irazú.

De 0-30 cm, pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo, pardo muy oscuro (10YR 3/3) en seco. Poco plástico y ligeramente adhesivo, suelto en seco. Regular contenido de materia orgánica, buen drenaje. Presencia de raíces pequeñas. Acido a moderadamente ácido. Su pH es de 6,45 en agua, 5,70 en KCl y 6,15 en  $\text{CaCl}_2$ .

Entre 30-55 cm, pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo, pardo amarillento (10YR 5/4) en seco, franco-arcilloso. Plástico en húmedo y ligeramente adhesivo, suave en seco, bajo contenido de materia orgánica. Presencia de residuos radiculares, buen drenaje. Acido a moderadamente ácido. Presenta un pH de 6,20 en agua, 5,25 en KCl y 5,67 en  $\text{CaCl}_2$ .

#### 3.1.1.8 La Rueda

Según Dondoli y Torres (51) pertenece a la serie Tobosi, cuyos suelos son de origen fluvio-lacustre con materiales provenientes tanto de los flancos del Irazú, como de las laderas del Macizo de la Carpintera y la formación sedimentaria del Sur; en gran parte del área dominan estos últimos, los cuales se depositaron en un estado avanzado de meteorización permitiendo que el segundo horizonte tenga un color pardo rojizo que se hace más notorio cerca del pie de los cerros. Son suelos de textura arcillosa, de fertilidad que varía de

mediana a buena.

Este perfil presenta cerca del contacto con la serie Guarco y al pie de los Cerros, pedregosidad a más de un metro, dominando en el primer caso los materiales del flanco del Irazú y en el segundo, de la formación sedimentaria. Existen algunas variantes locales dentro de este tipo constituídas por "ollas"pequeñas, en las que se presentan capas de materiales depositados en diferentes épocas, incluyendo una intermedia orgánica, como en la Finca "La Rueda" y variantes en cuanto a profundidad del primer horizonte y su contenido de cenizas y vidrios volcánicas recientes. Las muestras se eligieron aproximadamente a 1200 msnm y su dirección suroeste del volcán.

Son planos y de drenaje deficiente, por lo cual requieren avenamiento artificial, siendo este factor de mucha importancia en su manejo.

Entre 0-30 cm, pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo, pardo grisáceo oscuro (10YR 4/1) en seco, franco-limoso. Plástico y ligeramente adhesivo en húmedo y duro en seco. Alto contenido de materia orgánica, presencia de pequeñas piedras, raicillas y microorganismos. Acido a moderadamente ácido. El pH es de 5,90 en agua, 5,15 en KCl y 5,12 en  $\text{CaCl}_2$ .

Entre 30-60 cm, pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo, pardo grisáceo oscuro (10YR 4/1) en seco, franco-arcilloso. Plástico y poco adhesivo en húmedo, duro en seco. Bajo contenido de materia orgánica, presencia de grava y piedras de diferentes tamaños, el material arcillo-gravoso se encuentra llenando los intersticios entre las piedras. Se observa formación de terrones y un alto porcentaje de raicillas.

Acido a moderadamente ácido, con un pH en agua de 5,30, en KCl de 4,63 y en  $\text{CaCl}_2$  de 5,15.

### 3.2 Análisis físicos

#### 3.2.1 Características físicas generales

##### 3.2.1.1 Porcentaje de humedad

Para calcular los resultados en base a peso de suelo secado al horno, se determinó el porcentaje de humedad, a partir de 20 g de suelo secado al aire o suelo húmedo sometido a 105-110°C durante 24 horas. La fórmula empleada para la corrección de los resultados fue la siguiente (68):

$$M_s = \frac{M}{1 + \frac{H}{100}}$$

$M_s$  = masa de sólidos o masa del suelo secado al horno

$M$  = masa del suelo con humedad

$H$  = % de la humedad gravimétrica del suelo

##### 3.2.1.2 Color

El color de los suelos fue determinado empleando la escala de la carta de colores de Munsell (121).

##### 3.2.1.3 Densidad aparente

Esta propiedad se realizó por el método original de Blake (24) modificado por Forsythe (68).

##### 3.2.1.4 Densidad de partículas

Se utilizó la técnica de Blake (25) adaptada y



modificada por Forsythe (68). Los análisis se hicieron en muestras con materia orgánica y sin materia orgánica.

### 3.2.1.5 Análisis granulométrico

Se efectuó por el método combinado de hidrómetro y tamizado, originalmente expuesto por Bouyoucos (33), modificado por Day (47) y adaptado por Forsythe (68). También, se analizó por la técnica empleada por Ahmad y Prashad (3), en el cual se usa nitrato de zirconio como dispersante y el procedimiento seguido es el método modificado por Forsythe (68).

## 3,3 Análisis químicos

Los resultados obtenidos se expresan en peso seco a 110°C.

### 3.3.1 Características químicas generales

#### 3.3.1.1 Reacción del suelo (pH)

Esta determinación se realizó por el método del potenciómetro recomendado por Peech y colaboradores (127), efectuándose en tres tipos de soluciones diferenciales.

3.3.1.1.1 Suelo:agua 1:2,5

3.3.1.1.2 Suelo:CaCl<sub>2</sub> 0,01M 1:2

3.3.1.1.3 Suelo:KCl 1N 1:2,5

#### 3.3.1.2 Materia orgánica (MO)

Se empleó el método de combustión húmeda establecido por Walkley y Black, modificado por Safz del Rfo y Bornemisza (140). El carbono orgánico se calculó a partir del valor de la materia orgánica, dividiendo por el factor 1,724, proporción promedio de carbono

en la materia orgánica.

#### 3.3.1.3 Eliminación de la materia orgánica

Se efectuó mediante la acción del agua oxigenada al 30 por ciento, tratando de reducir el contenido de materia orgánica a tal grado que analizado por el método de Walkley y Black, modificado por Saíz del Río y Bornemisza (140) no sobrepasa un límite superior del 1 por ciento.

#### 3.3.1.4 Nitrógeno total

Se determinó por el método semi-microkjeldahl, modificado por Bremner (35).

#### 3.3.1.5 Capacidad de bases cambiables

Las bases cambiables de sodio, potasio, calcio, magnesio, fueron determinadas según el método modificado por Díaz-Romeu y Balerdi (50) y el método de la resina de intercambio elaborado por Fuentes (71), empleándose una resina fuertemente ácida (pH 4,4) de la Casa Fisher Scientific Company, marca REXYN 102 (H), con una capacidad de cambio total de 3,9 meq/g en seco y de 10,5 meq/g en húmedo.

#### 3.3.1.6 Determinación de hierro intercambiable

De acuerdo al método de resina de intercambio elaborado por Fuentes (71).

#### 3.3.1.7 Determinación de aluminio intercambiable

Según el método de resina de intercambio elaborado por Fuentes (71).

### 3.3.2 Capacidad de intercambio catiónico

Se emplearon los siguientes métodos:

#### 3.3.2.1 Método de NaOAc

Utilizándose el método de Bower y colaboradores (34).

#### 3.3.2.2 Método de $\text{NH}_4\text{OAc}$

Se determinó por el método de Bower y colaboradores (34), modificado por Díaz-Romeu y Balerdi (50).

#### 3.3.2.3 Método de $\text{Mg}(\text{OAc})_2$

Efectuado por el método original de Rich (134).

#### 3.3.2.4 Método de $\text{Ca}(\text{OAc})_2$ evitando errores de lavaje

De acuerdo al método recomendado por Fuentes (71).

#### 3.3.2.5 Método de $\text{BaCl}_2$ -TEA (Triethanolamine)

Se usó el método recomendado por Fuentes (71), adaptados de métodos convencionales.

### 3.3.3 Estudio de las fracciones de la materia orgánica

#### 3.3.3.1 Determinación de ácidos fúlvicos y ácidos húmicos

Se determinó según el método de Stevenson (152); en el procedimiento se utilizó 10 g de cada muestra de suelo. Para estudiar los ácidos fúlvicos se necesitó eliminar las sales de sodio mediante lavados con agua desionizada a temperatura de  $60^\circ\text{C}$ , o también diluyendo el complejo y centrifugándose para obtenerse en el sedimento los ácidos correspondientes.

3. 3.3.3.2 Capacidad de intercambio catiónico de las fracciones de la materia orgánica

Se determinó por el método de  $\text{Ca}(\text{OAc})_2$  evitando errores en el lavaje y el método de  $\text{BaCl}_2$ -TEA, ambos recomendados por Fuentes (71), utilizándose 0,1 g para la determinación de ácidos fúlvicos y 0,2 g para ácidos húmicos.

3.3.4 Oxidos hidratados "libres"

Se determinaron por los siguientes métodos:

3.3.4.1 Oxidos de hierro libre

Para los óxidos de hierro libre se usó básicamente la técnica de Kilmer (99), modificado por Bornemisza e Igue (29), siguiendo el procedimiento de Palencia (124).

3.3.4.2 Oxidos de aluminio libre

Para la determinación de los óxidos de aluminio libre se empleó el método de Hashimoto y Jackson, modificado por Bornemisza e Igue (29). De acuerdo con la técnica se colocan 5 g de suelo seco al aire y pasado por un tamiz no. 20 (de 0,84 mm) en un vaso de precipitados de 250 ml y se destruye la materia orgánica añadiendo alícuotas repetidas de 25 ml de peróxido de hidrógeno 1:1. Después se lava el suelo con dos porciones de HCl 1:5 de 25 ml cada una y con tres porciones de agua destilada de igual volumen. Luego se seca el suelo al aire en placas Petri y el suelo seco se pasa por un tamiz no. 10 (de 2 mm). Del suelo libre de materia orgánica se pesa 0,5 g, se coloca en un vaso de precipitado de 250 ml y se le añade 100 ml de NaOH 0,5 N, extrayendo los óxidos de Al por ebullición de la suspensión por

exactamente 2,5 minutos, ya que se cree que este tiempo es suficiente para disolver los óxidos libres y no dañará significativamente las arcillas presentes. Después de enfriada la suspensión en baño de agua, se centrifuga por tres minutos a 3000 rpm y se lava el residuo con tres alícuotas de 40 ml de NaOH 0,5N. Se combinan estos tres lavados con el extracto original y con agua destilada, se afora a 250 ml. De esta solución se hizo dilución 1:10 y se determinó el aluminio con el espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer, Mod. 303.

#### 3.3.4.3 Óxidos libres de Fe y Al

Los óxidos libres de Fe y Al se determinaron por el método de Mehra y Jackson (113).

#### 3.3.5 Alofán

La presencia cualitativa y cuantitativa del alofán se estudió por los siguientes métodos:

##### 3.3.5.1 Método Neozelandés

El alofán se analizó cualitativamente de acuerdo a la técnica de Fieldes y Perrot (63).

##### 3.3.5.2 Método del Valor Delta

El alofán se determinó semi-cuantitativamente según el método de Aomine y Jackson (9).

##### 3.3.5.3 Disolución selectiva

Se determinó el material amorfo presente en el suelo y los óxidos libre de aluminio, hierro y silicio, para lo cual se empleó el método de Hashimoto y Jackson (85). La técnica fue de pesar

el equivalente a 1 g de suelo seco a 110°C, sin materia orgánica. Se colocó en un beaker de níquel, agregándose 100 ml de NaOH 0,5N y se calienta exactamente por 2,5 minutos. El beaker caliente es enfriado inmediatamente en un recipiente con agua a temperatura normal, pesándose lo depositado y por diferencia de peso se determinan los materiales amorfos. El supernadante es centrifugado, teniéndose que la parte líquida contiene silicio y aluminio libres y la parte sedimentada contiene el hierro libre; a ambas partes se analizaron dichos elementos por el método de Mehra y Jackson (113) y se determinan en un espectrofotómetro de absorción atómica.

### 3.3.6 Espectrofotetría infrarroja

Los análisis se hicieron en un aparato Perkin Elmer Mod. 521 (Grating Infrared Spectrophometer) perteneciente al Departamento de Química de la Universidad de Costa Rica.

Se emplearon dos miligramos de muestra con 200 mg de KBr, los cuales fueron prensados a 20.000 kg/cm<sup>2</sup> para obtenerse la tableta utilizada por el aparato.

### 3.4 Análisis mineralógico

El examen mineralógico se efectuó en las muestras de Pavas Superficial y Profundo, Rancho Redondo Profundo, Cot Profundo y La Rueda Profundo, los cuales se consideraron como representativos de una secuencia del grado de desarrollo de los suelos estudiados.

El análisis siguiendo el método usado por Maldonado (108) consistió en agregar al suelo una solución de HCl 10 por ciento, para

luego elegir la fracción de 50  $\mu$ -500  $\mu$ , en la cual se separaron los minerales pesados y livianos con cloroformo. Posteriormente ambos se analizaron en un microscopio petrográfico ZEISS STANDARD GFLPOL.

### 3.5 Técnicas estadísticas

En el presente trabajo se realizó análisis de correlación múltiple para conocer el grado de asociación entre las variables, siendo en este caso referidas a capacidad de intercambio catiónico determinadas en muestras secas, en húmedas y sin materia orgánica, fracciones de la materia orgánica, óxidos hidratados "libres" de Fe, Al y Si, el alofán y otras características físico-químicas, que se estudiaron para determinar en qué medida una ecuación lineal u otro explica la relación entre variables (151).

El modelo de regresión fue usada para definir la influencia de diferentes variables sobre la CIC, fracciones de la materia orgánica, óxidos hidratados "libres" y el alofán (151).

La ecuación utilizada en la CIC fue:

$$Y_i = b_0 + b_1x_{1i} + b_2x_{2i} + b_3x_{3i} + b_4x_{4i} + b_5x_{5i} + \\ b_6x_{6i} + b_7x_{7i} + b_8x_{8i}$$

$Y_i$  = Capacidad de intercambio catiónico

$b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8$  = Coeficientes lineales de regresión

$b_0$  = Constante

$x_1$  = Materia orgánica

$x_2$  = Acidos fúlvicos

- $x_3$  = Acidos húmicos
- $x_4$  = Oxidos de hierro libre
- $x_5$  = Oxidos de aluminio libre
- $x_6$  = Oxidos de silicio libre
- $x_7$  = Alofán
- $x_8$  = Materiales amorfos

El modelo lineal de las fracciones de la materia orgánica es:

$$Y_i = b_0 + b_1x_{1i} + b_2x_{2i} + b_3x_{3i} + b_4x_{4i} + b_5x_{5i}$$

$Y_i$  = Acidos fúlvicos o ácidos húmicos

$b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$  = Coeficientes lineales de regresión

$b_0$  = Constante

$x_1$  = Acidos fúlvicos o ácidos húmicos

$x_2$  = Oxidos de hierro libre

$x_3$  = Oxidos de aluminio libre

$x_4$  = Oxidos de silicio libre

$x_5$  = Alofán

$x_6$  = Materiales amorfos

La ecuación empleada para óxidos hidratados "libres":

$$Y_i = b_0 + b_1x_{1i} + b_2x_{2i} + b_3x_{3i} + b_4x_{4i} + b_5x_{5i} + b_6x_{6i} + b_7x_{7i}$$

$Y_i$  = Oxidos hidratados "libres"

$b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7$  = Coeficientes lineales de regresión

$b_0$  = Constante

$x_1$  = Materia orgánica

$x_2$  = Acidos fúlvicos

$x_3$  = Acidos húmicos

$x_4$  = Oxidos de hierro o aluminio libres

$x_5$  = Oxidos de aluminio o silicio libres

$x_6$  = Alofán

$x_7$  = Materiales amorfos



La fórmula aplicada para alofán es:

$$Y_i = b_0 + b_1x_{1i} + b_2x_{2i} + b_3x_{3i} + b_4x_{4i} + b_5x_{5i} + b_6x_{6i} + b_7x_{7i} + b_8x_{8i} + b_9x_{9i}$$

$Y_i$  = Alofán

$b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9$  = Coeficientes lineales de regresión

$b_0$  = Constante

$x_1$  = Materia orgánica

$x_2$  = Acidos fúlvicos

$x_3$  = Acidos húmicos

$x_4$  = Oxidos de hierro libre

$x_5$  = Oxidos de aluminio libre

$x_6$  = Oxidos de silicio libre

$x_7$  = Materiales amorfos

$x_8$  = Densidad aparente

$x_9$  = Altitud

La prueba de Duncan se empleó en los métodos estudiados en base a un patrón (método de resina) (151).

#### 4. RESULTADOS

##### 4.1 Características generales de los suelos estudiados

Los resultados obtenidos referentes a algunas propiedades químicas de las 16 muestras están señaladas en el Cuadro 2, comprendiendo información sobre la capa superficial (suelo) como la profunda (subsuelo).

En relación a la reacción de los suelos, son de ácidas a ligeramente ácidas, oscilando los valores entre 5,30 y 6,58 en agua, de 4,63 a 5,88 con KCl y de 4,75 a 6,15 en  $\text{CaCl}_2$ . Se constata una gradual disminución de acidez con la profundidad en la mayoría de las muestras.

El contenido de materia orgánica fluctúa desde valores bajos de 0,34 por ciento (superficial de Rancho Redondo) hasta valores altos de 9,35 por ciento (superficial de La Rueda), habiendo tendencia de disminuir el contenido con la profundidad, a excepción de los suelos muy jóvenes (Rancho Redondo, Durazno, Sanatorio Durán), y a la vez aumentar con la altura en las muestras profundas.

Con respecto al nitrógeno total, se hallan valores entre 0,03 por ciento y 0,62 por ciento, los cuales están relacionados con la cantidad de materia orgánica y se observa que disminuyen el contenido de nitrógeno al aumentar la altura, principalmente en las muestras superficiales.

La relación carbono/nitrógeno se encuentra entre 4,31-15,66, destacándose que disminuye con la profundidad, a excepción de los suelos jóvenes.

Los datos de algunas propiedades físicas son presentados en

Cuadro 2. Características químicas de los suelos y subsuelos estudiados.

Muestra	pH		MO %	C %	N %	C/N	
	H <sub>2</sub> O	KCl 1N CaCl <sub>2</sub> 0,01M					
RR <sub>1</sub>	6,50	5,88	5,15	0,34	0,20	0,03	6,67
RR <sub>2</sub>	6,15	5,00	5,10	4,53	2,63	0,36	7,30
D <sub>1</sub>	6,35	5,48	5,57	1,40	0,81	0,14	5,79
D <sub>2</sub>	5,75	4,75	4,75	6,20	3,60	0,59	6,10
SD <sub>1</sub>	6,05	5,00	4,80	2,11	1,23	0,11	11,18
SD <sub>2</sub>	5,60	4,90	4,87	5,17	3,00	0,30	10,00
P <sub>1</sub>	6,45	5,25	5,17	3,25	1,89	0,17	11,12
P <sub>2</sub>	6,58	5,60	5,52	0,80	0,47	0,03	15,66
Ct <sub>1</sub>	6,15	5,40	5,65	7,24	4,21	0,53	7,94
Ct <sub>2</sub>	6,35	5,40	5,55	3,39	1,47	0,28	7,04
CH <sub>1</sub>	6,00	4,95	5,10	4,62	2,69	0,37	7,27
CH <sub>2</sub>	5,45	4,80	5,10	2,62	1,52	0,23	6,61
Cd <sub>1</sub>	6,45	5,70	6,15	4,83	2,81	0,44	6,39
Cd <sub>2</sub>	6,20	5,25	5,67	1,18	0,69	0,16	4,31
LR <sub>1</sub>	5,90	5,15	5,12	9,35	5,44	0,62	8,77
LR <sub>2</sub>	5,30	4,63	5,15	2,61	1,52	0,27	5,63

el Cuadro 3, expresando variabilidad en las diferentes muestras.

Las características texturales estudiadas tienen una variabilidad desde el suelo suelto, como en el caso de Rancho Redondo (94,5 por ciento de arena) hasta el suelo fino en La Chinchilla (39 por ciento de arena).

La densidad aparente tiene un rango entre 0,81-1,42 g/ml; siendo menor en las muestras profundas y relativamente alto para suelos volcánicos muy recientes.

La densidad de partículas se encuentra entre valores de 2,21-2,70 g/ml, observándose que en los suelos jóvenes disminuye con la profundidad, ocurriendo lo contrario con los medianamente desarrollados.

Los datos de porosidad total indican un incremento con la profundidad.

Los valores del espacio aéreo tienden a disminuir con la profundidad en las muestras de suelo jóvenes, siendo lo contrario en los suelos más desarrollados.

#### 4.2 Capacidad de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónico por los diferentes métodos empleados para la determinación en las muestras secas, húmedas y sin materia orgánica, se presentan en el Cuadro 4 y las correlaciones entre esta propiedad y las características químicas en el Cuadro 5.

Por el método de acetato de sodio con pH 8,2 se observa una tendencia a aumentar la CIC con el desarrollo del suelo variando entre 3,91 hasta 68,09 meq/100 g, encontrándose que es mayor en las muestras sin materia orgánica. Los valores de las muestras secas correlacionaron

Cuadro 3. Propiedades físicas de ocho suelos superficiales y subsuperficiales.

Muestras	SECO				HUMEDO				Poros. Total %	Dens. Part. c/MO g/ml	Dens. Part. s/MO g/ml	Desv. Estánd. s/MO	Desv. Estánd.		
	Ao %	Lo %	Arc. %	Textura	Ao %	Lo %	Arc. %	Textura							
RR <sub>1</sub>	87,13	12,87	0,00	Ao-Fco	76,00	23,25	0,75	Ao-Fco	47,60	1,42	0,04	2,70	0,04	2,74	0,03
RR <sub>2</sub>	59,25	39,75	1,00	Fco-Ao	67,50	31,50	1,00	Fco-Ao	59,24	1,01	0,06	2,49	0,05	2,62	0,02
D <sub>1</sub>	75,00	24,13	0,87	Ao-Fco	70,00	28,00	2,00	Ao-Fco	57,41	1,12	0,02	2,63	0,04	2,73	0,02
D <sub>2</sub>	65,00	31,50	3,50	Fco-Ao	49,75	44,50	5,75	Fco-Ao	66,88	0,81	0,02	2,43	0,03	2,58	0,01
SD <sub>1</sub>	76,00	23,50	0,50	Ao-Fco	79,00	19,25	1,75	Ao-Fco	49,17	1,37	0,05	2,69	0,04	2,72	0,03
SD <sub>2</sub>	54,00	38,75	7,25	Fco-Ao	59,00	34,50	6,50	Fco-Ao	55,38	1,15	0,04	2,57	0,03	2,65	0,04
P <sub>1</sub>	68,50	31,00	0,50	Fco-Ao	72,25	27,25	0,50	Fco-Ao	57,45	1,12	0,08	2,64	0,03	2,73	0,03
P <sub>2</sub>	67,00	32,00	1,00	Fco-Ao	69,00	30,50	0,50	Fco-Ao	67,84	0,84	0,03	2,62	0,02	2,71	0,02
Ct <sub>1</sub>	32,00	44,25	23,75	Franco	30,25	45,50	24,25	Franco	56,38	1,03	0,04	2,35	0,04	2,39	0,03
Ct <sub>2</sub>	25,25	55,75	19,00	Fco-Lo	46,00	42,75	11,25	Franco	62,66	0,92	0,03	2,45	0,04	2,47	0,02
CH <sub>1</sub>	22,75	45,00	32,25	Fco-Arc	28,50	44,50	27,00	Fco-Arc	57,38	1,23	0,04	2,53	0,03	2,55	0,04
CH <sub>2</sub>	18,50	43,50	38,00	FcoArcLo	27,50	39,50	33,00	Fco-Arc	51,56	1,25	0,03	2,56	0,04	2,59	0,01
Cd <sub>1</sub>	45,50	41,50	13,00	Franco	37,50	39,25	23,25	Franco	55,87	1,09	0,03	2,47	0,04	2,58	0,02
Cd <sub>2</sub>	25,00	43,00	32,00	Fco-Arc	35,50	40,00	24,50	Fco-Arc	58,59	1,06	0,01	2,56	0,04	2,60	0,03
LR <sub>1</sub>	28,00	46,00	26,00	Franco	44,00	33,00	23,00	Franco	59,51	0,90	0,04	2,21	0,06	2,40	0,02
LR <sub>2</sub>	25,00	45,50	29,50	Fco-Arc	39,50	37,50	23,00	Fco-Arc	56,82	1,07	0,02	2,47	0,04	2,53	0,02

	Densidad Aparente		Densidad de Partículas c/MO		Densidad de Partículas s/MO	
	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
Muestras superficiales	1,16	0,17	2,53	0,17	2,61	0,14
Muestras subsuperficiales	1,01	0,15	2,52	0,07	2,59	0,07

Cuadro 4. Capacidad de intercambio catiónico de ocho suelos y subsuelos determinados con cinco métodos en muestras secas (S), húmedas (H) y sin materia orgánica (SMO), expresado en meq/100 g\*.

MUESTRA	ACETATO DE SODIO			ACETATO DE AMONIO			ACETATO DE CALCIO			ACETATO DE MAGNESIO			CLORURO DE BARIO - TEA		
	pH 8,2		SMO	pH 7,0		SMO	pH 8,0		SMO	pH 7,0		SMO	pH 8,1		SMO
	S	H		S	H		S	H		S	H		S	H	
RR <sub>1</sub>	3,91	8,71	4,79	3,08	10,59	5,13	11,85	1,16	0,00	6,35	2,83	2,13	2,63	2,05	5,18
RR <sub>2</sub>	22,76	48,29	49,37	34,72	23,31	19,05	25,11	8,86	0,00	24,75	6,95	13,13	14,44	12,41	32,29
D <sub>1</sub>	6,53	10,49	6,64	8,79	10,71	13,92	15,44	2,35	0,00	13,38	1,71	7,25	3,95	3,22	5,19
D <sub>2</sub>	41,33	45,68	42,22	41,90	24,29	28,57	22,57	18,69	4,12	20,72	11,89	32,50	19,86	21,10	60,23
SD <sub>1</sub>	10,09	11,09	8,14	10,99	14,65	7,33	1,99	1,31	3,39	4,38	3,88	5,38	8,19	4,38	5,46
SD <sub>2</sub>	54,60	55,03	23,49	36,63	33,70	30,77	4,42	2,87	11,09	10,25	10,13	27,50	37,05	20,66	41,62
P <sub>1</sub>	46,55	46,80	41,98	15,39	19,05	6,60	1,51	1,05	4,92	5,38	4,50	11,13	17,19	11,82	13,87
P <sub>2</sub>	30,90	34,80	32,63	33,70	27,83	23,44	2,75	1,88	10,14	10,50	8,25	18,00	31,28	13,36	30,48
Ct <sub>1</sub>	49,89	53,51	50,46	58,89	34,66	51,28	48,64	29,38	12,51	27,00	30,54	42,88	29,79	25,35	66,00
Ct <sub>2</sub>	38,94	54,38	60,27	57,28	34,98	54,21	42,92	25,57	11,19	26,25	24,84	27,75	22,78	22,20	63,07
CH <sub>1</sub>	35,24	50,46	65,69	50,10	38,41	48,35	48,48	23,46	15,23	22,50	19,91	32,50	22,18	21,68	57,45
CH <sub>2</sub>	33,06	66,56	63,08	50,10	48,15	54,21	59,73	16,12	6,47	28,00	18,52	24,38	20,88	21,68	51,90
Cd <sub>1</sub>	33,37	51,33	61,99	50,98	40,29	42,49	38,83	19,37	8,08	40,75	20,73	41,88	21,90	19,71	58,99
Cd <sub>2</sub>	38,06	44,81	56,55	47,75	37,45	45,26	59,63	17,23	7,21	25,50	20,10	21,38	16,21	15,63	41,61
LP <sub>1</sub>	40,89	58,73	53,51	58,89	45,13	49,08	50,92	27,31	7,84	44,50	28,01	58,00	26,21	24,24	65,12
LP <sub>2</sub>	40,02	63,08	68,09	54,50	43,84	62,67	61,62	18,23	9,64	40,25	22,00	26,33	19,13	19,27	52,56

\* Corresponde a suelo secado al horno a 105°C-110°C.

Cuadro 5. Correlaciones de la CIC obtenidas por cinco métodos con las características químicas estudiadas de los ocho suelos superficiales y subsuperficiales.

Carac- terís- ticas	NaOAc		NH <sub>4</sub> OAc		Ca(OAc) <sub>2</sub>		Mg(OAc) <sub>2</sub>		BaCl <sub>2</sub> -TEA			
	Seco	Húmedo	Sin MO	Húmedo	Seco	Húmedo	Seco	Húmedo	Seco	Húmedo		
	Sin MO		Sin MO		Seco	Húmedo	Seco	Húmedo	Seco	Húmedo		
MO	0,60*	0,56*	--	0,50*	0,23	-0,02	--	0,10	0,07	0,00	0,42	--
AF	-0,50*	-0,47	--	-0,47	0,24	0,73**	--	0,68**	0,72**	0,72**	0,45	--
AH	0,45	0,35	--	0,30	0,27	0,20	--	0,30	0,22	0,19	0,58*	--
Fe	-0,30	-0,38	-0,26	-0,41	0,45	0,33	0,59*	0,66**	0,60*	0,42	0,36	0,18
Al	0,63**	0,76**	0,81**	0,78**	0,31	-0,39	-0,35	-0,03	-0,24	-0,14	0,26	0,89**
SI	-0,01	0,08	0,18	0,11	0,65**	0,56*	0,47	0,76**	0,67**	0,63**	0,70**	0,26
Alóf	0,71**	0,73**	0,67**	0,73**	0,06	-0,44	-0,43	-0,23	-0,26	0,16	0,28	0,76**
MA	0,58*	0,59*	0,47	0,61**	-0,33	-0,71**	-0,64**	-0,51*	-0,64**	-0,34	0,00	0,54*

\* Significativa 5%

\*\* Altamente significativa 1%

significativamente con materia orgánica ( $r = 0,60$ ), ácidos fúlvicos ( $r = -0,50$ ), Al libre ( $r = 0,63$ ), alofán ( $r = 0,71$ ) y materiales amorfos ( $r = 0,58$ ).

Las cifras en húmedo mostraron asociaciones con materia orgánica ( $r = 0,56$ ), Al libre ( $r = 0,76$ ), alofán ( $r = 0,73$ ) y materiales amorfos ( $r = 0,59$ ) y en las muestras sin materia orgánica detectaban asociaciones con Al libre ( $r = 0,81$ ) y alofán ( $r = 0,67$ ).

En el método de acetato de amonio a pH 7, la CIC osciló entre 3,08 y 62,27 meq/100 g, aumentando con el desarrollo del suelo y se observa que los valores son menores en las muestras sin materia orgánica.

La CIC en las muestras en seco señala correlación con materia orgánica ( $r = 0,58$ ), Al libre ( $r = 0,76$ ), alofán ( $r = 0,69$ ) y materiales amorfos ( $r = 0,51$ ).

Los datos del método de acetato de amonio en húmedo indican asociaciones con materia orgánica ( $r = 0,50$ ), Al libre ( $r = 0,78$ ), alofán ( $r = 0,73$ ) y materiales amorfos ( $r = 0,61$ ) y los resultados sin materia orgánica del método antes mencionado presentan correlaciones con Al libre ( $r = 0,76$ ) y alofán ( $r = 0,71$ ).

El acetato de calcio a pH 8 tiene rango de 0 a 61,62 meq/100 g para las CIC de estos suelos, aumentando con el grado de desarrollo de ellos, siendo superior en las muestras en seco e inferior en las muestras sin materia orgánica.

En los valores de muestras en seco con acetato de calcio, se obtuvo asociaciones con Si libre ( $r = 0,65$ ). Los datos en húmedo correlacionan con ácidos fúlvicos ( $r = 0,73$ ), Si libre ( $r = 0,56$ ) y



materiales amorfos ( $r = -0,71$ ). Las cifras sin materia orgánica dan asociaciones con Fe libre ( $r = 0,59$ ) y materiales amorfos ( $r = -0,64$ ).

Con el acetato de magnesio a pH 7 la CIC varía entre 2,13 y 58,00 meq/100 g, incrementándose con el grado de desarrollo del suelo. Además, se observa mayor capacidad de cambio en las muestras sin materia orgánica y es menor en las muestras húmedas.

La CIC de las muestras en seco determinado con el método anterior correlacionan con ácidos fúlvicos ( $r = 0,68$ ), Fe libre ( $r = 0,66$ ), Si libre ( $r = 0,76$ ) y materiales amorfos ( $r = -0,51$ ). Los datos en húmedo destacan asociaciones con ácidos fúlvicos ( $r = 0,72$ ), Fe libre ( $r = 0,60$ ), Si libre ( $r = 0,67$ ) y materiales amorfos ( $r = -0,64$ ). En muestras sin materia orgánica se encontró correlación con Fe libre ( $r = 0,50$ ), Si libre ( $r = 0,76$ ).

Con el  $\text{BaCl}_2$ -TEA se distinguen ámbitos de CIC entre 2,05 y 66,00 meq/100 g, teniéndose mayor capacidad de cambio en las muestras sin materia orgánica y menor en las muestras húmedas, que se incrementa con el grado de desarrollo del suelo. Los valores en muestras en seco presentan correlaciones con ácidos fúlvicos ( $r = 0,72$ ) y Si libre ( $r = 0,63$ ). Las cifras en húmedo están asociadas con ácidos húmicos ( $r = 0,58$ ) y Si libre ( $r = 0,70$ ). Los resultados sin materia orgánica expresan correlaciones con Al libre ( $r = 0,89$ ), alofán ( $r = 0,76$ ) y materiales amorfos ( $r = 0,54$ ).

En forma general se observa que la CIC aumenta con la profundidad y con el grado de desarrollo del suelo; a la vez que se distingue variación en las cifras obtenidas de un método con respecto a los otros.

Con la prueba de Duncan se encontró que el método de  $\text{Ca}(\text{OAc})_2$  es el más aceptable en la determinación de la CIC en las muestras secas y el método de  $\text{NH}_4\text{OAc}$  para las muestras húmedas. En las muestras sin materia orgánica se indican los métodos de  $\text{NH}_4\text{OAc}$  y  $\text{BaCl}_2$ -TEA.

En los Cuadros 4 y 5 del Apéndice se determinan los cationes cambiables por los métodos de resina y del acetato de amonio, observándose que los valores obtenidos son superiores por el primer método indicado.

#### 4.3 Fracciones de la materia orgánica

Los datos de ácidos húmicos y fúlvicos se presentan en el Cuadro 6 y las correlaciones de estas fracciones con otras características químicas en el Cuadro 7.

De acuerdo a los resultados de los ácidos fúlvicos, estos tienden a aumentar con la profundidad en los suelos muy jóvenes y disminuir en los suelos con cierto grado de desarrollo.

Los valores de ácidos fúlvicos se encuentran correlacionados con ácidos húmicos ( $r = -0,66$ ), Fe libre ( $r = 0,76$ ), Si libre ( $r = -0,61$ ), alofán ( $r = -0,55$ ), materiales amorfos ( $r = -0,57$ ), densidad aparente ( $r = 0,91$ ) y altitud ( $r = 0,58$ ).

Las cifras de ácidos húmicos indican que la concentración de esta fracción es inferior en las muestras profundas y aumentan con el grado de desarrollo del suelo. Se ha detectado correlaciones significativas con ácidos fúlvicos ( $r = -0,66$ ) y las propiedades subsiguientes: Fe libre ( $r = -0,59$ ), Al libre ( $r = 0,56$ ), Si libre ( $r = 0,64$ ), alofán ( $r = 0,73$ ), materiales amorfos ( $r = 0,72$ ), densidad aparente

Cuadro 6. Porcentajes de las fracciones orgánicas en el carbono total y sus relaciones en ocho suelos y subsuelos determinados en seco y húmedo.

M U E S T R A	Carb. Org.	Acidos Húmicos						Acidos Fúlvicos						Relación AH/AF			
		Seco			Húmedo			Seco			Húmedo			Seco		Húmedo	
		Suelo	Carbono	%	Suelo	Carbono	%	Suelo	Carbono	%	Suelo	Carbono	%	Suelo	Carbono	Suelo	Carbono
-RR <sub>1</sub>	0,20	0,10	22,91	0,12	20,52	0,21	35,91	0,19	32,49	0,64	0,64	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	
RR <sub>2</sub>	2,63	1,72	22,08	1,64	21,05	2,38	30,55	2,13	27,34	0,72	0,72	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	
-D <sub>1</sub>	0,81	0,62	25,75	0,64	26,58	0,65	26,96	0,63	26,16	0,95	0,95	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	
D <sub>2</sub>	3,60	2,91	27,29	2,89	27,09	2,10	19,69	2,51	23,91	1,39	1,39	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	
-SD <sub>1</sub>	1,23	0,94	25,90	1,02	28,10	0,89	24,52	0,90	24,80	1,06	1,06	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	
SD <sub>2</sub>	3,00	2,34	26,34	2,53	28,51	1,47	16,56	1,58	17,80	1,59	1,59	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	
P <sub>1</sub>	1,89	1,28	22,90	1,21	21,65	0,73	13,06	0,81	14,49	1,75	1,75	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	
P <sub>2</sub>	0,47	0,41	29,80	0,43	31,25	0,39	28,34	0,37	26,89	1,05	1,05	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	
-Ct <sub>1</sub>	4,21	2,65	21,28	2,48	19,91	2,09	16,78	2,03	16,30	1,27	1,27	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	
Ct <sub>2</sub>	1,97	1,35	23,15	1,33	22,81	0,96	16,47	0,81	13,89	1,41	1,41	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	
.CH <sub>1</sub>	2,69	1,85	23,28	1,40	17,62	1,16	14,60	1,33	16,74	1,59	1,59	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	
CH <sub>2</sub>	1,52	1,27	28,18	1,33	29,51	1,01	22,41	1,16	25,74	1,26	1,26	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	
-Cd <sub>1</sub>	2,81	2,24	26,97	2,15	25,88	1,82	21,91	1,85	22,27	1,23	1,23	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	
Cd <sub>2</sub>	0,69	0,61	30,05	0,59	29,07	0,50	24,63	0,55	27,10	1,22	1,22	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	
-LR <sub>1</sub>	5,44	3,06	19,03	3,11	19,34	1,70	10,57	1,86	11,56	1,80	1,80	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	
LR <sub>2</sub>	1,52	1,06	23,61	1,10	24,51	0,87	19,38	0,93	20,64	1,22	1,22	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	

Cuadro 7. Correlaciones de las fracciones de la materia orgánica con otras características químicas de los suelos estudiados.

Características	Acidos Fúlvicos		Acidos Húmicos	
	Seco	Húmedo	Seco	Húmedo
MO	-0,38	-0,32	0,18	0,15
AF	--	--	-0,70**	-0,66**
AH	-0,70**	-0,66**	--	--
Fe	0,41	0,76**	-0,58*	-0,59*
Al	-0,16	-0,46	0,47	0,56*
Si	0,25	-0,61**	0,64**	0,64**
Alofán	-0,24	-0,55*	0,73**	0,73**
MA	-0,02	0,57*	0,71**	0,72**
Dap	0,68**	0,91**	-0,65**	-0,62**
Alt	0,11	0,58*	-0,78**	-0,79**

\* Significativa 5%

\*\* Altamente significativa 1%

( $r = -0,62$ ) y altitud ( $r = -0,79$ ).

La relación ácidos húmicos/ácidos fúlvicos indica que oscilan entre 1-2 en las muestras estudiadas.

En el Cuadro 8 del Apéndice se designan los valores de la CIC de los ácidos fúlvicos y húmicos.

En la determinación de la CIC en los ácidos fúlvicos por el método de  $\text{Ca}(\text{OAc})_2$  evitando errores en el lavaje, se constataron valores entre 30,50 y 88,65 meq/100 g, y por el método de  $\text{BaCl}_2$ -TEA entre 57,67 y 237,98 meq/100 g. Estos valores son mayores con el método de  $\text{BaCl}_2$ -TEA y superiores en las muestras profundas.

Las cantidades de la CIC obtenidas en los ácidos húmicos por el método de  $\text{Ca}(\text{OAc})_2$  evitando errores en el lavaje están en el ámbito de 46,85 y 183,09 meq/100 g, y por el método de  $\text{BaCl}_2$ -TEA se estimaron entre 25,55 y 89,98 meq/100 g. Las cifras más altas se presentan en el método de  $\text{Ca}(\text{OAc})_2$  y tiende a ser mayores en las muestras profundas.

#### 4.4 Oxidos hidratados "libres"\*

En el Cuadro 8 se distinguen los datos de óxidos hidratados "libres" determinados por diferentes métodos en muestras secas y húmedas. Las correlaciones de estos con otras características se indican en el Cuadro 9.

En los resultados obtenidos por el método de Kilmer modificado por Bornemisza e Igue (29), los sesquióxidos de hierro tienden a aumentar con la madurez del suelo y los valores son menores en las

---

\* Se pueden denominar sesquióxidos u óxidos "activos" (29).

Cuadro 8. Contenido de óxidos "libres" en ocho suelos y subsuelos determinados por tres métodos en muestras secas y húmedas.

MUESTRAS	SECAS meq/100 g						HUMEDAS meq/100 g											
	Kilmer*			Hashimoto y Jackson*			Mehra y Jackson			Kilmer*			Hashimoto y Jackson*			Mehra y Jackson		
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
RR <sub>1</sub>	0,08	0,04	0,34	0,01	1,37	0,06	0,06	1,20	0,13	0,29	1,10	0,01	1,58	0,42	0,20	1,46		
RR <sub>2</sub>	0,23	0,17	0,81	0,01	2,03	0,06	0,19	1,56	0,34	0,61	4,25	0,03	2,20	1,97	0,82	1,78		
D <sub>1</sub>	0,02	0,09	0,40	0,01	1,65	0,04	0,09	1,46	0,04	0,29	1,10	0,01	1,84	0,34	0,23	1,56		
D <sub>2</sub>	0,11	0,21	1,15	0,01	1,93	0,09	0,20	1,54	0,21	0,69	5,07	0,03	2,12	2,02	1,00	1,86		
SD <sub>1</sub>	0,21	0,61	0,70	0,01	1,16	0,28	0,29	0,62	0,25	0,72	1,49	0,03	1,35	0,77	0,36	0,71		
SD <sub>2</sub>	0,25	1,13	1,63	0,01	1,23	0,60	0,61	0,88	0,30	1,17	2,14	0,01	1,41	1,30	0,66	0,98		
P <sub>1</sub>	0,28	0,66	1,53	0,01	1,22	0,36	0,26	0,68	0,32	0,69	1,93	0,01	1,46	0,64	0,40	0,88		
P <sub>2</sub>	0,32	0,86	2,61	0,01	1,27	0,68	0,44	0,86	0,38	0,92	3,57	0,01	1,64	1,38	0,59	1,09		
Ct <sub>1</sub>	0,02	0,87	2,78	0,01	2,44	0,74	1,16	2,20	0,06	0,70	3,93	0,01	2,68	1,00	1,06	2,40		
Ct <sub>2</sub>	0,02	0,94	3,42	0,01	2,85	0,78	1,16	2,57	0,02	0,83	8,85	0,01	2,97	1,49	1,83	2,85		
CH <sub>1</sub>	0,02	1,43	3,23	0,01	2,61	0,91	1,47	2,44	0,02	0,86	7,33	0,01	2,80	1,04	2,10	2,70		
CH <sub>2</sub>	0,02	1,40	4,37	0,01	2,20	0,97	1,52	2,48	0,02	0,84	7,65	0,01	2,95	1,13	2,09	2,89		
Cd <sub>1</sub>	0,02	0,59	4,21	0,01	2,29	0,40	0,90	2,08	0,02	0,80	5,88	0,03	2,50	1,03	1,53	2,27		
Cd <sub>2</sub>	0,01	0,90	4,95	0,01	2,72	0,36	1,12	2,38	0,02	0,82	5,95	0,03	2,80	1,13	1,57	2,61		
LR <sub>1</sub>	0,04	0,97	5,24	0,03	4,11	0,51	0,84	3,77	0,08	0,72	3,99	0,04	4,41	0,87	0,94	4,24		
LR <sub>2</sub>	0,02	1,04	5,82	0,03	2,89	0,74	0,99	2,48	0,02	0,80	4,57	0,03	3,04	0,96	1,07	2,68		

Cuadro 9. Correlaciones de los óxidos hidratados "libres" con otras características de los suelos estudiados.

Características	Óxidos de hierro		Óxidos de aluminio		Óxidos de silicio	
	Seco	Húmedo	Seco	Húmedo	Seco	Húmedo
MO	-0,05	-0,10	0,50*	0,43	0,58*	0,59*
AF	0,41	0,76**	-0,16	-0,46	-0,25	-0,61**
AH	-0,58*	-0,59*	0,47	0,56*	0,64**	0,64**
Fe	--	--	-0,06	-0,31	-0,35	-0,46
Al	-0,06	-0,31	--	--	0,83**	0,82**
Si	-0,36	-0,46	0,83**	0,82**	--	--
Al <sub>of</sub> .	-0,26	-0,35	0,70**	0,76**	0,77**	0,78**
MA	-0,55*	-0,52*	0,35	0,53*	0,68**	0,71**
Dap	0,65**	0,69**	-0,37	-0,51*	-0,63**	-0,65**
Alt	0,46	0,49*	-0,64**	-0,74**	-0,87**	-0,89**

\* Significativa 5%

\*\* Altamente significativa 1%

muestras superficiales. Además, se observa que las cifras de sesqui-óxidos de aluminio son pequeñas y se acrecentan en las muestras profundas.

De acuerdo a la técnica de Hashimoto y Jackson, modificado por Bornemisza e Igue (29), se determinó los valores de los sesquióxidos de aluminio y silicio. Los valores así obtenidos se incrementan con la profundidad. En las muestras húmedas se observan que las concentraciones de los sesquióxidos de hierro son muy pequeños y similares en todas las muestras. Según el método de Mehra y Jackson, los óxidos hidratados "libres" tienen valores más altos en las muestras profundas y ellos son superiores en la determinación de las muestras húmedas.

En forma general, se puede señalar que las cantidades de los óxidos hidratados "libres" de las muestras húmedas son superiores que a las muestras secas.

El Fe libre en seco indica correlaciones con ácidos húmicos ( $r = -0,58$ ), materiales amorfos ( $r = -0,55$ ) y densidad aparente ( $r = 0,65$ ). Las cifras en húmedo para esta misma característica expresan las correlaciones siguientes: ácidos fúlvicos ( $r = 0,76$ ), ácidos húmicos ( $r = -0,59$ ), materiales amorfos ( $r = -0,52$ ), densidad aparente ( $r = 0,69$ ) y altitud ( $r = 0,49$ ).

El Al libre en seco correlaciona con materia orgánica ( $r = 0,50$ ), Si libre ( $r = 0,83$ ), alofán ( $r = 0,70$ ) y altitud ( $r = -0,64$ ). Los valores en humedad están asociados con ácidos húmicos ( $r = 0,56$ ), Si libre ( $r = 0,82$ ), alofán ( $r = 0,76$ ), materiales amorfos ( $r = 0,53$ ), densidad aparente ( $r = -0,51$ ) y altitud ( $r = -0,74$ ).



El Si libre en seco tiene asociaciones con materia orgánica ( $r = 0,58$ ), ácidos húmicos ( $r = 0,64$ ), Al libre ( $r = 0,83$ ), alofán ( $r = 0,77$ ), materiales amorfos ( $r = 0,68$ ), densidad aparente ( $r = -0,63$ ), y altitud ( $r = -0,87$ ). Los datos en húmedo correlacionan con materia orgánica ( $r = 0,59$ ), ácidos fúlvicos ( $r = -0,61$ ), ácidos húmicos ( $r = 0,64$ ), Al libre ( $r = 0,82$ ), alofán ( $r = 0,78$ ), materiales amorfos ( $r = 0,71$ ), densidad aparente ( $r = -0,65$ ) y altitud ( $r = -0,89$ ).

#### 4.5 Alofán

Los datos correspondientes a la determinación del alofán se encuentran en el Cuadro 10 y las correlaciones con otras características en el Cuadro 11.

De acuerdo al método Neozelandés, se observan rangos de variabilidad entre 8,90 y 11,45, teniendo similitud en las cifras obtenidas de la mayoría de las muestras, lo que se debe a las características de este método cualitativo.

Según el método semicuantitativo del valor delta se consiguieron valores que aumentan con la profundidad y que oscilan entre 10,28 y 80,36 por ciento. Los valores del alofán se correlacionan con ácidos húmicos ( $r = 0,73$ ), Al libre ( $r = 0,76$ ), Si libre ( $r = 0,78$ ), materiales amorfos ( $r = 0,68$ ) y altitud ( $r = -0,81$ ).

Se presentan los resultados de acuerdo al método de disolución selectiva en el Cuadro 12, señalando que el contenido de materiales amorfos disminuye con la profundidad y el grado de desarrollo del suelo. Se constata que las cantidades de los óxidos libres, de aluminio, hierro, y silicio tienden a aumentar con el desarrollo y con la profundidad.

Cuadro 10. Determinación de alofán por dos métodos en ocho muestras superficiales y subsuperficiales del Irazú.

Muestras	Valor Delta (Semicuantitativo)			Método Neozelandés (Cualitativo)		
	Alof. solub.	V. Delta	Alof. tot.	2 mín.	30 mín.	60 mín.
	%	%	%			
RR <sub>1</sub>	10,07	0,21	10,28	9,55	9,75	9,80
RR <sub>2</sub>	15,15	3,39	18,54	11,00	11,30	11,45
D <sub>1</sub>	6,30	10,81	17,11	9,30	9,80	9,85
D <sub>2</sub>	24,50	11,21	35,71	10,30	11,00	11,15
SD <sub>1</sub>	59,73	6,18	65,91	9,30	9,70	9,75
SD <sub>2</sub>	72,19	6,70	78,89	9,35	9,95	10,10
P <sub>1</sub>	29,04	2,06	31,10	10,30	10,70	10,75
P <sub>2</sub>	21,52	6,70	28,22	10,50	10,90	11,00
Ct <sub>1</sub>	42,78	13,64	56,42	9,70	10,40	10,50
Ct <sub>2</sub>	46,93	20,60	67,53	9,60	10,55	10,70
CH <sub>1</sub>	47,90	12,87	60,77	9,20	9,80	9,90
CH <sub>2</sub>	47,13	10,30	57,43	9,05	9,60	9,70
Cd <sub>1</sub>	32,99	6,69	39,68	9,30	10,00	10,10
Cd <sub>2</sub>	46,21	12,62	58,83	9,20	9,70	9,95
LR <sub>1</sub>	21,52	12,88	34,40	8,90	9,40	9,50
LR <sub>2</sub>	55,64	24,72	80,36	9,30	9,30	10,00

Cuadro 11. Correlaciones del alofán con otras características de los ocho suelos superficiales y subsuperficiales.

Característica	MO	AF	AH	Fe	AI	Si	MA	Dap	Alt
Alofán	0,39	0,23	0,73**	-0,35	0,76**	0,78**	0,68**	-0,45	-0,81**

\* Significativa 5%

\*\* Altamente significativa 1%

Cuadro 12. Determinación de alofán (material amorfo) y óxidos "libres" en ocho muestras superficiales y subsuperficiales.

Muestra	DISOLUCION SELECTIVA (Semicuantitativo)							
	CON MATERIA ORGANICA (%)				SIN MATERIA ORGANICA (%)			
	Mater. amorfos	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Mater. amorfos	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
RR <sub>1</sub>	69,90	0,26	0,29	2,94	70,80	0,30	0,31	3,96
RR <sub>2</sub>	60,15	2,62	1,14	10,16	64,74	2,65	1,55	17,91
D <sub>1</sub>	59,81	0,42	0,54	4,81	62,19	0,57	0,66	6,42
D <sub>2</sub>	52,64	3,15	1,30	13,90	53,28	3,46	1,85	15,19
SD <sub>1</sub>	59,79	0,42	0,54	4,22	64,07	0,57	0,66	5,46
SD <sub>2</sub>	54,76	2,10	2,17	11,77	55,83	2,31	2,62	12,41
P <sub>1</sub>	55,30	1,18	1,01	5,08	57,30	1,23	1,11	5,89
P <sub>2</sub>	59,88	2,14	1,62	7,75	61,37	2,32	1,94	10,42
Ct <sub>1</sub>	48,53	4,13	3,13	16,19	51,67	4,42	3,94	21,83
Ct <sub>2</sub>	38,70	4,42	4,03	18,72	42,69	4,48	4,68	22,90
CH <sub>1</sub>	46,92	3,72	4,05	15,08	49,84	4,48	4,56	21,51
CH <sub>2</sub>	37,78	3,12	4,16	10,91	38,25	4,10	4,91	17,91
Cd <sub>1</sub>	36,73	2,58	3,46	10,96	40,88	2,76	3,14	21,44
Cd <sub>2</sub>	31,73	3,24	4,01	11,77	32,68	5,53	5,76	23,18
LR <sub>1</sub>	37,20	2,45	2,29	22,10	41,85	7,94	4,54	45,71
LR <sub>2</sub>	28,11	3,02	1,91	13,10	30,90	3,55	2,24	20,37

Asimismo, se observa que los valores de las muestras sin materia orgánica son superiores a los de las muestras con materia orgánica.

#### 4.6 Espectrometría infrarroja

Los patrones y los análisis de las muestras se indican en las Figuras 3, 4 y 5.

##### 4.6.1 Rancho Redondo Superficial

El diagrama señala que es un material alofánico con su banda definida con una máxima alrededor de  $3450\text{ cm}^{-1}$  y la presencia de materiales silíceos preferiblemente amorfos en presencia de fases alofánicas iniciales en las bandas de bajas frecuencias; además, se observa una banda a  $370\text{ cm}^{-1}$  que puede sugerir la presencia de cierta cantidad de goetita.

##### 4.6.2 Rancho Redondo Profundo

Es similar a la anterior en relación al material, pero se observa una banda bien definida a  $1130\text{ cm}^{-1}$  que supone la existencia de un material más organizado que la muestra anterior, pudiéndose explicar por la formación de filosilicatos, posiblemente metahaloisita. En las altas frecuencias la presencia de bandas débiles puede indicar la mezcla de material caolinítico con el material alofánico, a la vez de pequeños hombros de  $3625$  y  $3540\text{ cm}^{-1}$  podría sugerir la presencia de gibbsita.

##### 4.6.3 Durazno Superficial

El diagrama indica que es material alofánico, posiblemente con presencia de minerales de capas, como por ejemplo haloisita. La

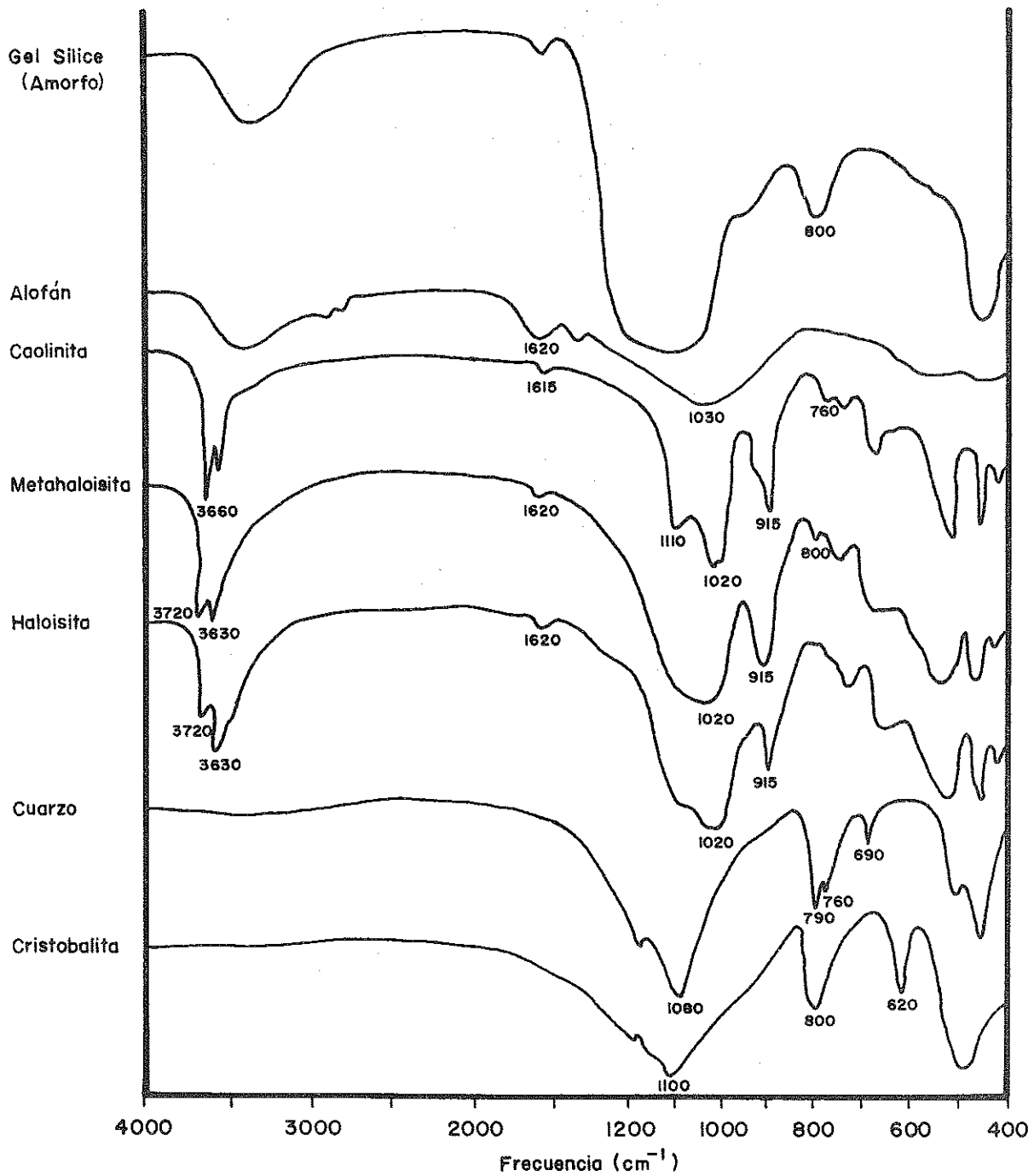


Fig. 3 - Diagramas de absorción infrarroja de los patrones de minerales amorfos y cristalinos estudiados en este trabajo.

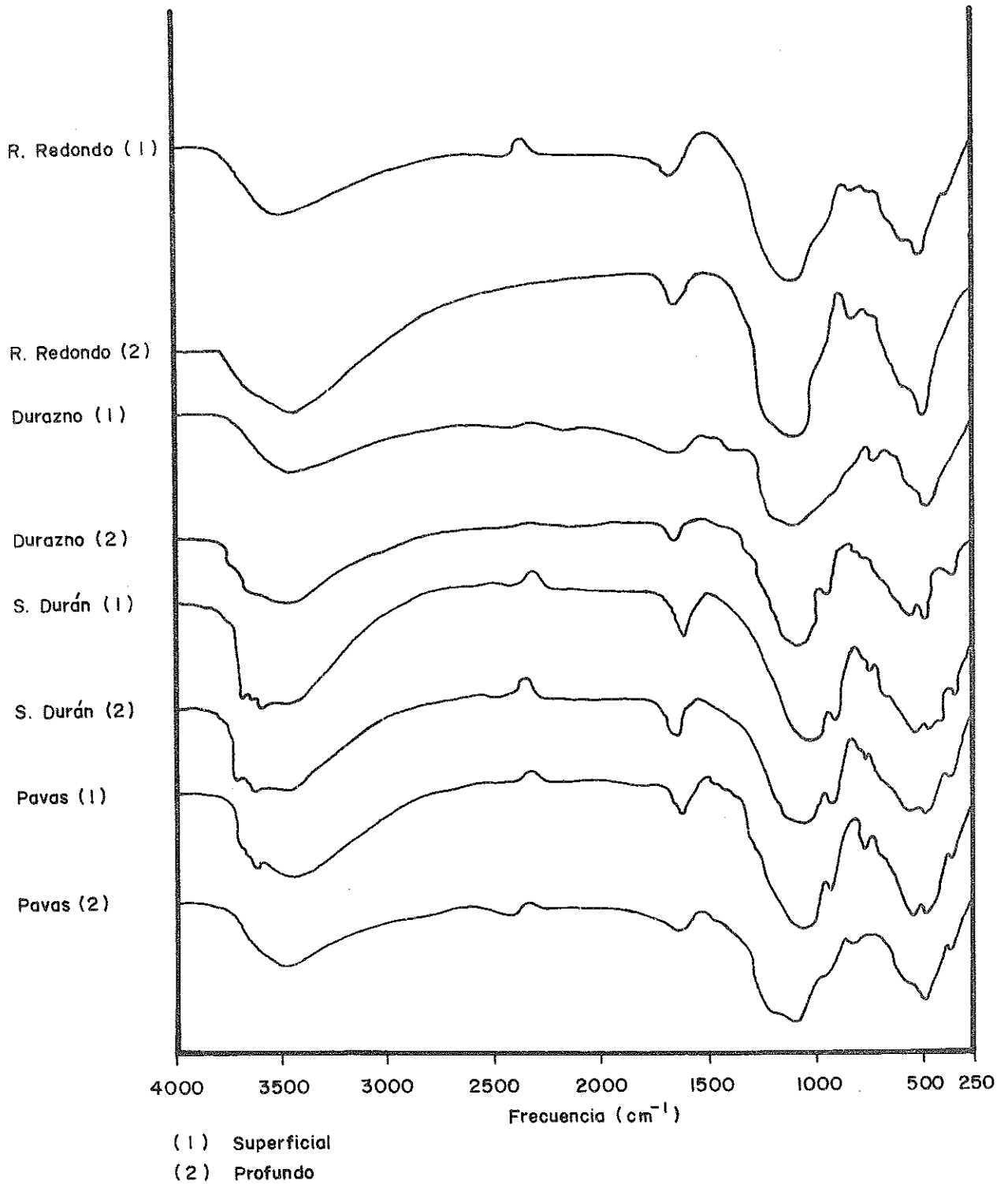
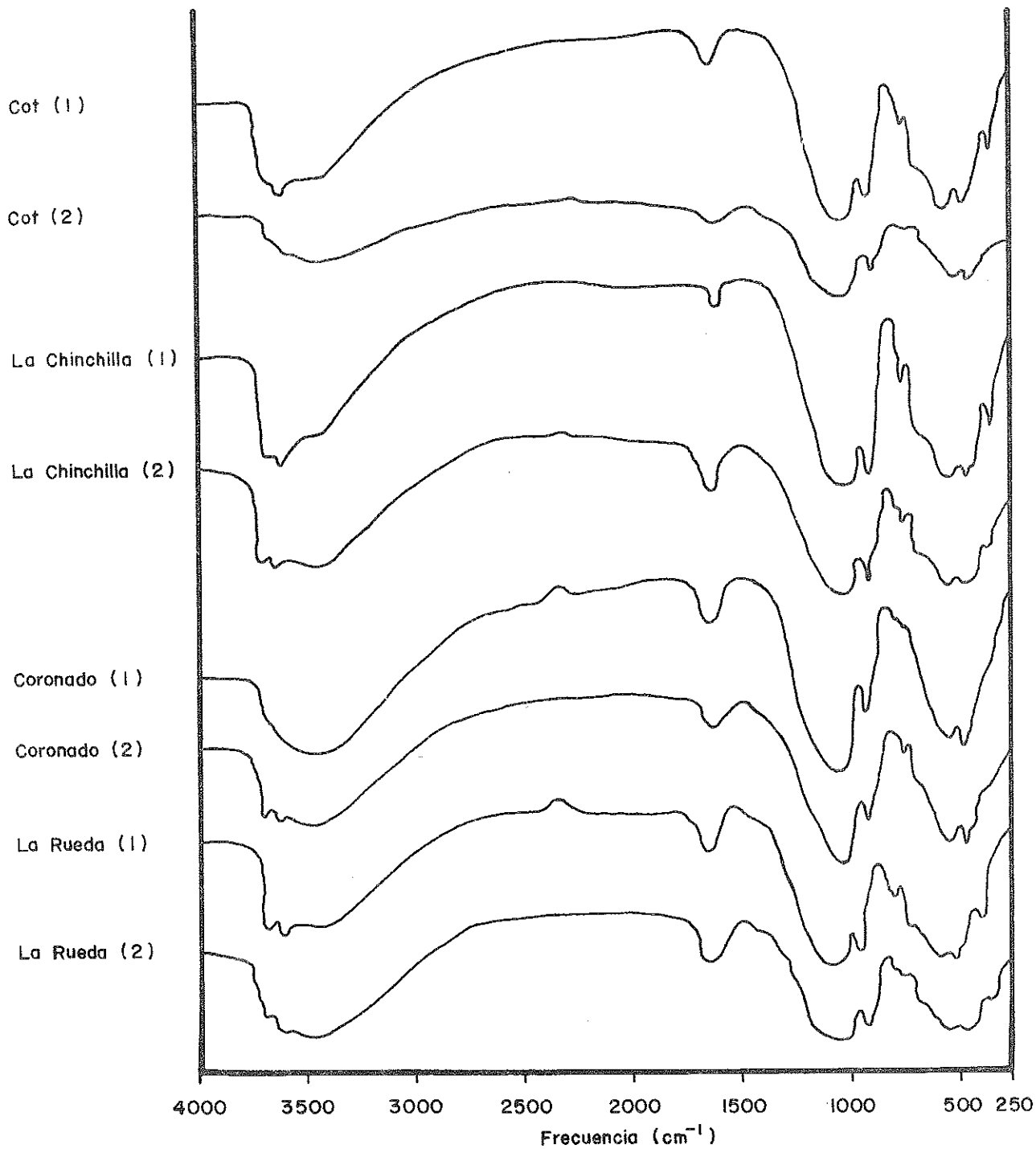


Fig. 4- Diagramas de absorción infrarroja de las muestras menos desarrolladas, superficiales y subsuperficiales de la región del Volcán Irazú.



(1) Superficial  
 (2) Profundo

Fig. 5- Diagramas de absorción infrarroja de las muestras más desarrolladas, superficiales y subsuperficiales de la región del Volcán Irazú.



banda a  $800\text{ cm}^{-1}$  podría interpretarse debido a la existencia de alfa-cristobalita y de vidrios volcánicos. No se descarta la posibilidad de que exista algo de cuarzo.

#### 4.6.4 Durazno Profundo

Las diferentes bandas identifican la muestra como material alofánico, con cierto contenido de haloisita y gibbsita.

#### 4.6.5 Sanatorio Durán Superficial

Esta muestra se interpreta como un material alofánico. Sin embargo, puesto que la banda de Si-O se sitúa a  $1070\text{ cm}^{-1}$ , se podría concluir que la sílice está parcialmente polimerizada tendiendo hacia una estructura de red. Las bandas a  $3620$  y  $3050\text{ cm}^{-1}$  pueden indicar la presencia de gibbsita.

#### 4.6.6 Sanatorio Durán Profundo

El espectro IR demuestra ser de un material alofánico, encontrándose bandas entre  $3600-3700$  que reflejan una mezcla de gibbsita con haloisita, en presencia de material amorfo; además, las bandas a bajas frecuencias indican la presencia de haloisita, por lo cual esta muestra es muy diferente a la anterior.

#### 4.6.7 Pavas Superficial

El diagrama es similar a la muestra anterior, con la diferencia de presentar una banda a  $1430\text{ cm}^{-1}$  que puede indicar la presencia de hissingierita.

#### 4.6.8 Pavas Profundo

Las diversas bandas a altas y bajas frecuencias indican que es material alofánico; la banda a 1430 posiblemente revela hisingerita y la banda definida a  $800\text{ cm}^{-1}$  está señalando la presencia del gel del sílice,  $\alpha$ -cristobalita o, tal vez, algo de cuarzo.

#### 4.6.9 Cot Superficial

El diagrama muestra que es material alofánico, el cual se encuentra mezclado con cierta cantidad de haloisita, algo de gibbsita y material amorfo.

#### 4.6.10 Cot Profundo

Las bandas en altas y bajas frecuencias son similares a la anterior, pero con mayor contenido de alofán; se presenta posiblemente gibbsita y por la banda de  $795\text{ cm}^{-1}$  puede encontrarse cuarzo.

#### 4.6.11 La Chinchilla Superficial

Esta muestra revela escaso contenido de alofán y las bandas de altas y bajas frecuencias señalan probablemente una haloisita bien cristalizada.

#### 4.6.12 La Chinchilla Profundo

Es similar a la muestra anterior.

#### 4.6.13 Coronado Superficial

Las diferentes bandas de altas y bajas frecuencias definen al alofán en presencia de minerales cristalinos, contra los cuales podría presentarse metahaloisita, o como lo indican las bajas frecuencias, haloisita.

#### 4.6.14 Coronado Profundo

Las bandas de altas y bajas frecuencias están más definidas que la muestra anterior, señalando la presencia de haloisita y cierto contenido de alofán, y posiblemente la presencia de gibbsita; es éste un suelo más evolucionado que el anterior.

#### 4.6.15 La Rueda Superficial

El diagrama representa las bandas muy definidas en altas y bajas frecuencias, mostrando la presencia de haloisita principalmente por la banda a  $1030 \text{ cm}^{-1}$  y, además, observándose una estructura muy ordenada, conteniendo poco alofán. Este suelo es más desarrollado que Coronado.

#### 4.6.16 La Rueda Profundo

Similar al anterior, pero menos desarrollado.

De acuerdo a la interpretación de los análisis de absorción infrarroja de estos suelos, se puede decir que con la secuencia del grado de desarrollo de ellos, se observa una tendencia a formarse materiales más organizados, correspondientes a minerales paracristalinos y cristalinos. Al igual que en las muestras jóvenes se constata el material más meteorizado en los horizontes profundos, caso contrario sucede con los suelos más desarrollados, donde los horizontes superficiales tienen una meteorización más avanzada y en consecuencia, se detecta la existencia de minerales más organizados.

## 4.7 Análisis mineralógico

El estudio mineralógico de algunas muestras se asigna en el Cuadro 14 del Apéndice.

### 4.7.1 Rancho Redondo Profundo

En el análisis mineralógico se observa en los minerales pesados la existencia de hiperstena y augita, con presencia de granos gruesos y finos, algunos de estos revestidos con vidrios. En los minerales livianos se distinguieron feldespatos y vidrios volcánicos encontrándose recubiertos de material opaco.

### 4.7.2 Pavas Superficial

En el análisis mineralógico se determina en los minerales pesados predominio de granos gruesos de hiperstena y augita, encontrándose algunos revestidos de material opaco; en cuanto a los minerales livianos se detecta la presencia de feldespatos (plagioclasas) y vidrios volcánicos claros y oscuros, los cuales muestran poca meteorización, encontrándose éstos revestidos de materiales opacos. Probablemente los vidrios son básicos por el índice de refracción alto y su color oscuro.

### 4.7.3 Pavas Profundo

En el análisis mineralógico se distingue en los minerales pesados una mayor proporción de granos gruesos, especialmente de augita y menor porcentaje de hiperstena. La augita se encuentra en mayor cantidad que en Pavas Superficial.

En los minerales livianos están presentes feldespatos y vidrios,

algunos de estos granos están revestidos de material opaco.

#### 4.7.4 Cot Profundo

El análisis mineralógico indica en los minerales pesados la existencia de hiperstena y augita en menor cantidad que en Rancho Re do n d o y Pavas; los granos son más finos que en los suelos mencionados. En los minerales livianos se observa un bajo contenido de feldespatos y vidrios volcánicos; una gran proporción de los granos finos de estos ma te ri a l e s se encuentran revestidos de material opaco.

#### 4.7.5 La Rueda Profundo

El examen mineralógico señala en los minerales pesados la existencia de hiperstena y augita en menor cantidad que en Cot y la muestra posee mayor proporción de grano fino. Se constata la presencia de hornblenda. En los minerales livianos se determina granos pequeños de feldespatos y vidrios volcánicos, además se observan fitolitos y algunos granos revestidos de material opaco.

## 5. DISCUSION

### 5.1 Características generales

En el Cuadro 3 se indican algunas propiedades físicas de los suelos estudiados.

Los valores de la densidad aparente de las muestras son relativamente altas, siendo estos valores similares a los de Zavaleta (176) y superiores a las de otros autores para suelos volcánicos (99, 101, 106), con tendencia a disminuir con la profundidad. En los suelos recientes se puede deber al pequeño grado de desarrollo en las muestras profundas (133) y en los suelos más desarrollados posiblemente por la frecuencia de material grueso en su composición. Además, esta propiedad puede estar influenciada por el tipo de suelo, el cual depende de la calidad y naturaleza de las cenizas (14).

En la densidad de partículas, las cifras obtenidas están entre los rangos encontrados en Japón (93), Soto (150), y superiores a los de Costa Rica (106). Estos altos valores se pueden deber a la presencia de óxidos de hierro y fueron indicados ya para muestras recientes.

Los valores superiores encontrados en la densidad de partículas en muestras sin materia orgánica, indican la influencia que tiene este compuesto sobre esta propiedad (93, 106) lo que confirma su papel cementante tan importante y revela la íntima asociación en la materia orgánica y la fracción inorgánica.

La textura fue determinada en muestras secas y húmedas no mostrando las cifras diferencias significativas. Algunas muestras señaladas en el Cuadro 1 del Apéndice se analizaron con el método de Ahmad y

Prashad (3), encontrando así un mayor contenido de arcilla que las determinadas por el método modificado por Forsythe (68). Esto indica que posiblemente la dispersión del suelo es más completa en estas muestras por el método de Ahmad y Prashad.

Los porcentajes de porosidad total guardan relación con los valores encontrados para la densidad aparente y el contenido de materia orgánica de las muestras estudiadas.

Otras características físicas se señalan en este mismo Cuadro 3: espacio aéreo, color, humedad gravimétrica y humedad volumétrica; se consideran estos datos dentro de los ámbitos corrientes para este tipo de suelo (106, 107, 145).

En relación con las características químicas señaladas en el Cuadro 2, los valores del pH determinado están próximos a los determinados por otros autores (6, 93, 101, 107).

La variabilidad de las cifras encontradas para la materia orgánica está de acuerdo con el proceso de meteorización de las cenizas; teniéndose que en cenizas frescas se encuentra un bajo análisis de materia orgánica debido a la presencia de vidrios volcánicos y su desarrollo incipiente, caso contrario sucede en las cenizas más degradadas en que se incrementa el contenido de materia orgánica debido al proceso de meteorización que comienzan a sufrir los vidrios volcánicos que resulta en materiales adsorbentes de la MO y por la acumulación de la misma por el proceso de formación del suelo.

La tendencia de la materia orgánica a aumentar con la profundidad, tiene explicación debido a la existencia de horizontes enterrados, lo cual es confirmado por estudios realizados en la zona por Knox y Maldonado (101).

La relación C/N se encuentra en el rango indicado por otros autores (93, 106, 107), para andosoles y es justificable por el alto contenido de materia orgánica y el moderado contenido de nitrógeno (107, 124).

En los Cuadros 4 y 5 del Apéndice, se observan las bases cambiables extraídas con  $\text{NH}_4(\text{OAc})$  y resina, constatándose que los valores encontrados por la resina son superiores al método de acetato de amonio pH 7, confirmando lo encontrado por Fuentes (71). Estas cifras están entre los rangos determinados por Bornemisza (32) en suelos volcánicos.

Otra observación es que los valores de las bases cambiables obtenidos en seco son más altos que los de las muestras en húmedo. Esto está de acuerdo con lo señalado por Fuentes (11) y Soto (150) para suelos de Costa Rica.

Los datos en las muestras sin materia orgánica son mayores que los encontrados en las con materia orgánica, lo cual indica que radicales de la materia orgánica se encuentran ocupando sitios con cargas negativas correspondiendo a los cationes cambiables en las arcillas, estando en concordancia con otros autores (11, 23, 71, 77, 79, 150).

En el Cuadro 7 del Apéndice se muestran los datos del aluminio y hierro cambiables, determinados por el método de resina, considerándose que estos valores se encuentran entre los rangos determinados por Fuentes (71), aunque posiblemente algunos valores altos se deban a la disolución del aluminio estructural por el pH ácido de la resina.

Los datos de estos elementos en muestras sin materia orgánica son superiores a los con materia orgánica. Esto se puede deber a la



formación de complejo de radicales de la materia orgánica con aluminio y hierro, lo cual disminuye los contenidos de estos elementos cambiabiles en las muestras con materia orgánica (23, 77, 124).

Por otra parte, se observa la tendencia a aumentar la concentración de aluminio y hierro cambiabiles en los horizontes profundos, lo cual se explica por la meteorización avanzada de ellos al considerarse horizontes enterrados (101). Además, se constata el incremento del contenido de estos elementos con el grado de desarrollo de las muestras.

## 5.2 Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

En este párrafo se discutirá lo correspondiente a los resultados de la CIC, teniéndose en consideración que el valor de esta propiedad en suelos volcánicos depende de numerosos aspectos, por lo cual se estima importante comparar una serie de métodos para comprender mejor los factores que influyen en estos fenómenos en suelos de cenizas volcánicas recientes.

Al observar con detenimiento los valores obtenidos en el Cuadro 4, se puede constatar que las cifras del método de acetato de sodio son superiores a los rangos determinados por Maldonado (108), teniéndose que las muestras sin materia orgánica dan valores altos en comparación con las muestras en seco y húmedo, condición corroborada por Pratt y Grover (132). Esto se explicaría basándose en que radicales de la materia orgánica o la presencia de material inerte se encuentran ocupando espacios estructurales en la superficie de las arcillas, los cuales bloquearían las cargas negativas de ellas, reflejándose en una disminución de la CIC en las muestras con materia orgánica, lo que es evidente,

por la asociación negativa significativa de la fracción orgánica y de esta propiedad en las muestras en seco. Otra causa es posiblemente por formar complejos con los materiales amorfos, los cuales al quedar libres incrementarían relativamente la CIC, corroborado por la asociación negativa significativa entre materiales amorfos y este método en seco y húmedo. La capacidad de sustancias orgánicas de ocupar posiciones de intercambio es bien conocida desde las investigaciones de Ensminger y Gieseking (56).

En cuanto al método de acetato de amonio se pueden señalar que los promedios obtenidos se aproximan a los determinados por otros autores (71, 72, 160); son superiores a Pineda (129), Luzuriaga (106), Palencia (124) y próximos a Bornemisza y Morales (31), observándose que los valores en las muestras secas, húmedas y sin materia orgánica no presentan variabilidad entre ellas, lo cual indica que posiblemente la materia orgánica no tiene una marcada influencia en las determinaciones encontradas por este método o que tal vez se haya efectuado en forma deficiente el proceso de lavaje de este procedimiento, siendo muy probable ya que el acetato es fuertemente adsorbido por las grandes superficies de las arcillas del tipo de alofán (20). Esto es confirmado, al señalar una asociación positiva altamente significativa del alofán con este método; asimismo, se permite explicar los altos valores obtenidos con este método en comparación con los otros.

Con el método de acetato de calcio evitando errores de lavaje, las cifras determinadas son similares a las de Fuentes (71). Estos valores se consideran relativamente bajos en comparación con los otros

métodos, lo cual se podría explicar a causa de una hidrólisis del calcio absorbido en el suelo o la retención de sales de exceso por la arcilla en los otros métodos, coincidiendo en esta apreciación con este mismo autor (71) y con Le Roux (105). En este método, los valores de las muestras sin materia orgánica son inferiores a las con materia orgánica, corroborando la influencia de la materia orgánica en la CIC indicada por otros autores (17, 77, 95, 175) ya que se nota por la asociación positiva significativa de este método con la fracción orgánica.

Los datos del método de acetato de magnesio indican cantidades relativamente bajas en relación con el método de acetato de amonio. Esto se debe a que el magnesio no contribuye a la retención del acetato como el amonio, por lo tanto, este método se recomienda para la determinación de la CIC de cierto grupo de suelos (134). A la vez, los valores de las muestras sin materia orgánica son superiores a los con materia orgánica, tendencia similar al método de acetato de amonio; esto se ha explicado anteriormente, a consecuencia de radicales de la materia orgánica que bloquean la carga negativa de los sitios estructurales de la superficie de las arcillas (56, 77), lo cual se refleja en la disminución de la CIC. Este aspecto estaría relacionado directamente con lo expuesto en otros estudios (37, 77, 150).

El acetato de magnesio presenta asociación positiva altamente significativa con el acetato de calcio, lo que es lógico, ya que siendo sales de cationes similares y de un mismo anión deberán tener el mismo comportamiento.

Los valores obtenidos por el método de  $\text{BaCl}_2$ -TEA son próximos a los encontrados por Fuentes (71). Sin embargo, estas cifras se

consideran relativamente bajas, posiblemente debido a una hidrólisis del bario en el lavaje o a una deficiencia en el proceso de reemplazo, lo que concuerda con la interpretación de Fuentes (71), o también, que sobre pH 7 disminuye la capacidad de adsorción de este ión (13). Además, se observa que las muestras sin materia orgánica tienen la misma tendencia a las de los métodos de acetato de sodio y acetato de magnesio, habiéndose ya explicado la causa del fenómeno (56, 77). Esto es confirmado al obtener asociaciones positivas altamente significativas.

Las cifras superiores encontradas en unas muestras húmedas con respecto a algunas secas por los diferentes métodos, caben interpretarse en el sentido de que posiblemente al secarse el suelo se presentaría un cambio en el grado de orden/desorden del material constitutivo en la fracción arcilla, caracterizado por una fuerte cementación de las partículas y en consecuencia se produciría una disminución de la superficie específica en el estado seco (no efectuándose proceso reversible al humedecerse), lo que permite llegar a mantener un exceso sustancial de la CIC en los suelos húmedos, tendencia similar a lo observado por Kanehiro y Sherman (96) y Schalscha y colaboradores (144).

En cuanto a los valores superiores en muestras secas con relación a húmedas, se puede interpretar como una consecuencia de error en el lavaje o en el proceso de reemplazo del catión, así como al utilizarse alcohol (propanol) se observó una dispersión de arcilla en algunos suelos húmedos, y por consiguiente, ocurrió pérdida de arcilla que disminuyó la CIC. También puede deberse a la presencia de materiales inorgánicos amorfos no definidos, que al secarse colaborarían en el

aumento de la CIC en las muestras secas. Harada y Wada, citados por Sadzawka (140), encontraron esta tendencia, refiriendo que la CIC no depende únicamente del grado de disolución, sino también de la composición de la arcilla alofánica. A la vez Sadzawka (140) informa que al secarse la superficie de estos suelos se reduce la carga eléctrica positiva acelerando la descomposición de la materia orgánica y fortaleciendo los grupos ácidos del alofán.

Aún existiendo duda, especialmente en relación a la preparación del alofán puro (17) y al rol que juegan los óxidos de hierro-aluminio de bloquear cargas negativas de la arcilla (46) o a los complejos de la materia orgánica asociada al alofán en cuanto a inhibir o incrementar la superficie específica, se podrán esperar estos resultados (17).

Los datos de este mismo cuadro señalan el incremento de la CIC con la profundidad en los suelos jóvenes, tendencia similar a los encontrados por González (76), pudiendo deberse al aumento de la superficie específica con la profundidad, siendo referido por este mismo investigador (76), o por estar los suelos superficiales constituidos por material volcánico muy reciente (10 años de edad), lo cual no le ha permitido desarrollar su CIC o ambos fenómenos al mismo tiempo. Otra razón es por considerarse horizontes enterrados con presencia de materiales amorfos que se encuentran más meteorizados y por lo tanto, presentan mayor CIC que los superficiales.

Por otra parte, en los suelos más desarrollados se observan la CIC más alta en las muestras superficiales; esta situación podría interpretarse en el sentido de haberse paralizado el proceso de degradación

en las partes más profundas por la existencia de un horizonte superficial de gran espesor (76, 101), el cual contiene deposición de cenizas recientes que se meteorizan rápidamente por la influencia de factores climáticos presentes (124), y lo que confirma una asociación positiva altamente significativa. Otra explicación, es por la formación de compuestos intermedios de poca superficie específica:  $2,5 \text{ m}^2/\text{g}$  (81) y altamente hidrolizado que tendería a disminuir la CIC en la profundidad (17, 76).

Las muestras que presentan un bajo valor de CIC y pequeña variación con respecto al pH de la solución extractora, podría interpretarse por la presencia de una estructura elemental, donde predominan los minerales primarios sobre los amorfos como el de Rancho Redondo y Durazno Superficiales; caso contrario sucede con las muestras de alta CIC que pueden indicar mayor desarrollo mineralógico y en consecuencia, tener un mayor porcentaje de material amorfo. Esto es confirmado por el análisis mineralógico realizado en algunas muestras de este estudio.

En general, los métodos estudiados y probados para analizar muestras secas, húmedas y sin materia orgánica, indican que algunos de ellos han dado resultados próximos a los obtenidos por otros investigadores (71, 72, 106, 107, 124), pero se ha encontrado una gran variabilidad al comparar los valores de un método con respecto al otro esto se puede deber a la variación de la carga eléctrica en las arcillas en función de pH (82) atribuyéndose a las causas: disociación de  $\text{H}^+$  desde grupos silanoles ( $-\text{SiOH}$ ) y parcialmente a variaciones en el estado de coordinación del aluminio de octaédrico a tetraédrico (164), por lo

cual sería dependiente del pH de equilibrio y concentración de la solución (82, 130), y a los efectos del catión desplazante (21, 23).

Por otra parte, teniendo en cuenta que la mayoría de estas muestras contienen silicatos de aluminio y hierro más o menos amorfos, los cuales bajo ciertas condiciones pueden contribuir a la capacidad de cambio, y en estos materiales se supone que su capacidad de fijar bases depende en un alto porcentaje de pH (17, 77).

Los resultados obtenidos por los diferentes métodos en las muestras sin materia orgánica son superiores a las muestras con materia orgánica, teniendo tendencia similar a los resultados obtenidos por Soto (150), Fuentes (71) y Palencia (124). Esto se explicó anteriormente, asumiendo que radicales de la materia orgánica bloquean cargas negativas de los intersticios estructurales de las arcillas, formándose un complejo organo-alo-fánico que dificulta la adsorción de los cationes y en consecuencia, se obtienen valores bajos de la CIC en las muestras con materia orgánica y con un pH sobre 7 (130).

Las muestras estudiadas se consideran que contienen alofán y otros materiales inorgánicos amorfos de acuerdo a la variabilidad de los datos obtenidos en la CIC, que es explicable por las sustituciones isomórficas entre aluminio y sílice en coordinación tetraédrica, y a la presencia de hidróxidos de aluminio  $(Al(OH)_2)^+$  y  $(Fe(OH)_2)^+$ . Esto está de acuerdo con lo explicado por Besoain (17) y Blasco (26).

De lo anterior se deduce que los métodos convencionales para determinar la CIC están sujetos a muchos errores en el caso de estos suelos, y eso explica la alta variación de los valores de ella (73, 74, 82, 130). Por lo tanto, se puede decir que la CIC de suelos volcánicos

recientes es un dato bastante arbitrario, ya que depende de la proporción de la carga dependiente del pH incluido en sus cálculos y esta carga es muy importante en los materiales formadores de estos suelos. Por ello, parece ser muy dudoso poder hablar de la CIC en un sentido absoluto sino en relación a un determinado pH en caso de los suelos volcánicos recientes.

Además del pH, es de hacerse notar el efecto del tipo de catión reemplazante (45). En este trabajo se encontró que los métodos empleados de iones monovalentes ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Na}^+$ ) indicaron mayor CIC que los métodos de iones divalentes ( $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ), lo cual es confirmado por las correlaciones significativas entre los iones monovalentes, y teniéndose un menor grado de correlación entre los iones divalentes, no existiendo significancia entre los iones monovalentes y divalentes.

Lo antes expuesto tiene su explicación por el efecto de radio iónico y la diferencia de las cargas eléctricas (11, 17, 21, 23, 79, 149). También puede deberse al pH empleado en las soluciones extractantes que facilitó la disponibilidad de los radicales carboxílicos de la fracción orgánica, los cuales dan la capacidad monovalente (130) y en consecuencia incrementaron los valores de las determinaciones de la CIC con los métodos de iones monovalentes.

Por la variabilidad de los valores en los análisis de estas muestras, puede haber influencia de los lavados en la remoción de las sales de exceso; esto es explicable ya que la CIC puede variar de acuerdo a las sales y del tipo de disolvente empleado. Wada y Ataka (164) manifiestan que este fenómeno en la CIC, se debe a la atracción no



culómbica de cationes y aniones equivalentes a la retención de moléculas de sales. Según esto, la CIC no daría valores confiables ya que no puede estipularse el número de lavados para la remoción satisfactoria de las sales (73, 74, 82).

En base a los resultados encontrados en la prueba de Duncan, donde el método con  $\text{Ca}(\text{OAc})_2$  es el considerado como el procedimiento estándar para las determinaciones con muestras secas y el método del  $\text{NH}_4\text{OAc}$  para las muestras húmedas, este último método, debido a que su pH es próximo al punto isoeléctrico (P.I.=6,0) del alofán y así se espera que los valores obtenidos representen adecuadamente a esta arcilla (17). En las muestras sin materia orgánica se determinaron los métodos de  $\text{NH}_4\text{OAc}$  y  $\text{BaCl}_2$ -TEA. El primer método tiene explicación con lo anteriormente dicho, en cambio el segundo método considera en su CIC la inclusión de los  $\text{H}^+$  debilmente ácidos y la acidez relacionada con el Al extraíble que forma complejos o hidróxidos de aluminio (41, 71), y que probablemente lo asemeja a las determinaciones del método patrón.

Las comparaciones de los métodos en las muestras secas indican como similares a los datos de  $\text{NaOAc}$ ,  $\text{NH}_4\text{OAc}$  y  $\text{Ca}(\text{OAc})_2$ , mientras que en las muestras húmedas no existen estas comparaciones entre métodos. En tanto, las muestras sin materia orgánica señalan similitud con los métodos de  $\text{NaOAc}$  y  $\text{BaCl}_2$ -TEA.

Resumiendo, la CIC es un fenómeno complejo en los suelos volcánicos, debido a que el material predominante es el alofán y que actualmente no está bien definido por el hecho de que no es una especie sino una serie, con rango amplio de orden/desorden, teniendo propiedad de

cambio variable, dependiendo la determinación de la CIC de las condiciones experimentales, de la variabilidad en cuanto a la especie misma, lo cual implica una doble fuente de variables y que la expresión cuantitativa tenga un valor restringido (17).

Así se podría seguir hablando de innumerables limitaciones y fuentes de errores, todo lo cual demuestra que los valores determinados por los diferentes procedimientos son relativos, basándose cada uno de ellos según lo que se desee encontrar, ya que dan valores más o menos aceptables para ciertas características, especialmente el pH y naturaleza del catión reemplazante.

Otro aspecto interesante, es que en las muestras que presentan incipiente evolución, se detectan pequeñas cantidades de minerales primarios (alfa-cristobalita y feldespatos, plagioclasas), hecho comprobado por el análisis petrográfico en algunos de estos suelos por Maldonado\*, probablemente provenientes de los materiales volcánicos originales.

### 5.3 Fraccionamiento de la Materia Orgánica

Los valores de ácidos fúlvicos y ácidos húmicos presentados en el Cuadro 6 son menores que los encontrados en Japón (93) y similares a datos de España (58).

Los resultados experimentales permiten observar que no existen

---

\* Colaboración personal en este estudio.

diferencias notorias entre las determinaciones en húmedo y seco, lo cual indica que en estas condiciones no hay alteración manifiesta de los componentes de la materia orgánica, estando de acuerdo con las asociaciones positivas altamente significativas determinadas en estas fracciones.

Los contenidos de ácidos fúlvicos son mayores que los de ácidos húmicos en los suelos jóvenes. Esto se debe a la lenta descomposición de la materia orgánica, debida a las elevadas altitudes que causan alta precipitación y baja temperatura (59). Esto es evidente, al determinar una asociación positiva significativa entre altitud y ácidos fúlvicos, y además por la presencia de material amorfo, principalmente alofán. En los suelos que se consideran más desarrollados, los porcentajes de ácidos húmicos son superiores a los fúlvicos, y se cree que éstos se deben al efecto de la mayor meteorización química de la materia orgánica a inferiores altitudes, más que todo debida a las altas temperaturas (59), lo cual es patente, al encontrarse una asociación negativa significativa entre ácidos fúlvicos y ácidos húmicos.

Los porcentajes de ácidos fúlvicos y ácidos húmicos tienden a variar en las diferentes muestras en relación al contenido de la materia orgánica, confirmado por varios autores (1, 2, 10, 18, 58, 63).

La relación ácidos húmicos/ácidos fúlvicos (A<sub>CH</sub>/A<sub>CF</sub>) de todas estas muestras que se encuentran entre los rangos 0,71-2,63, datos que se consideran aceptables según la relación dada por Tan (155).

Los resultados de la CIC de los ácidos húmicos y fúlvicos se presentan en el Cuadro 8 del Apéndice, los cuales nos están indicando

una mayor capacidad de intercambio catiónico en los ácidos fúlvicos por el método de  $\text{BaCl}_2$ -TEA, lo que concuerda con estudios realizados por investigadores chilenos\*. Esta misma tendencia se observa en la CIC por la técnica de  $\text{Ca}(\text{OAc})_2$  evitando errores en el lavaje en los ácidos húmicos, mostrando similitud a los resultados encontrados por Bhandari y colaboradores (18), lo que puede sugerir que la CIC en estos ácidos depende de la solución con la que se saturan y posiblemente del catión reemplazante. Es importante hacer énfasis en la mayor retención de los cationes polivalentes por las sustancias orgánicas (37, 77).

#### 5.4 Oxidos hidratados "libres"

De acuerdo al Cuadro 8, se observan los valores de los óxidos de aluminio, hierro y silicio.

Los valores de los óxidos de hierro "libres" comparados con los de Japón (93), Hawai (146), España (138) y Costa Rica (107) son relativamente bajos y están entre los rangos determinados en algunos suelos de Costa Rica (124). La causa de estos valores bajos se puede deber a que la mayoría de los suelos son recientes y los procesos de meteorización han tenido poco tiempo para actuar sobre ellos, o debido a encontrarse formando sustancias complejas con las fracciones orgánicas, lo cual es comprobado por la asociación positiva y el efecto altamente significativo encontrado entre el hierro y la fracción orgánica, concordando con Soto (150), Greenland (77) y Ministerio de Agricultura de Japón (93).

---

\* Besoain, E. Comunicación personal, abril 1974.

Por otra parte, se observa la tendencia de los óxidos de hierro "libres" de aumentar con la profundidad; esto permite suponer que se presenta una meteorización más avanzada en los horizontes inferiores, y/o pueden indicar la presencia de horizontes enterrados a causa de superposición de cenizas volcánicas recientes, como en el caso de los suelos de Rancho Redondo y Durazno. Esto confirma los datos de Palencia (124) para suelos volcánicos.

Con respecto a los óxidos "libres" de aluminio, los valores encontrados son menores a los determinados en Japón (93), Costa Rica (29), Hawaii (146) y semejantes a trabajo efectuado en Costa Rica (124). La tendencia de estos valores son similares a los de los óxidos "libres" de hierro, sugiriendo que está relacionado con el grado de meteorización explicado anteriormente. Esta tendencia coincide con lo encontrado por Palencia (124).

La intensidad de los procesos de meteorización permite mayor liberación de los óxidos de aluminio que los de hierro; esto es explicable por la presencia del alofán en estas muestras, y notándose en la asociación positiva altamente significativa presentada por el aluminio y el alofán y lo cual es señalado por Rodríguez (138) en andosoles de España.

En relación a los porcentajes de  $\text{SiO}_2$  libre, los datos encontrados son inferiores a los resultados en España (138), de Japón (140), lo que se debe probablemente a la naturaleza más básica de las cenizas del Irazú (83).

Estas muestras siguen una secuencia al aumentar el contenido de

$\text{SiO}_2$  libre con el proceso de génesis, debido a que el silicio tiende a perderse rápidamente por desilicatación, lo cual coincide con el criterio expuesto por Besoain (17) y confirma datos de Bornemisza (32).

Los contenidos de Al y Si se encuentran ligados fuertemente al alofán en la formación de estos suelos, como lo confirma la asociación positiva altamente significativa obtenida entre estos datos y que es apoyada por el trabajo de Yoshinaga (173).

En forma general, los resultados obtenidos en los óxidos "libres" indican que están relacionados directamente con el grado de meteorización de los suelos, y en consecuencia con los materiales amorfos presentes en ella, que se refleja en la correlación altamente significativa, y lo cual es confirmado con el análisis de contenido de materiales amorfos (disolución selectiva) de estas muestras, y tal como lo señalan los resultados de Sánchez en suelos volcánicos de España.

Se observa que las cantidades de óxidos "libres" determinados en las muestras húmedas son superiores a las secas. Esto se debe a que por ser suelos en proceso de desarrollo se presenta un porcentaje apreciable de geles de óxidos hidratados, lo cual en condiciones de humedad del suelo, permite una mayor liberación de estos elementos. En caso de las muestras secas, los contenidos menores pueden atribuirse a que el material amorfo al contraerse dificulta la liberación de estos óxidos "libres" (48). Especialmente, es evidente esta tendencia en el hierro que muestra una asociación negativa significativa con los materiales amorfos.

## 5.5 Alofán

Los resultados señalados en el Cuadro 10 del alofán determinado por el método del valor delta, se hallan entre los ámbitos indicados por otros investigadores (9, 124, 129). Estos resultados indican la génesis del coloide mineral señalado para estos suelos en el cual el material secundario predominante es el alofán, lo que está indicado por la alta significancia al correlacionarlo con materiales amorfos que se presenta en el Cuadro 11.

Estos valores expresan como promedio que el contenido de alofán tiende a aumentar con la profundidad, como consecuencia del mayor grado de meteorización del vidrio volcánico en los horizontes inferiores, y confirma los resultados dados en el análisis de espectro infrarrojo de estas muestras. Esto también puede estar reforzado a consecuencia de las deposiciones recientes de cenizas volcánicas que han sepultado horizontes con diferentes grados de meteorización. Este comportamiento fue observado por varios autores (101, 106, 109, 124) en suelos volcánicos.

Se puede notar que los suelos que se caracterizan por un bajo contenido de alofán, son aquéllos que se encuentran en el estado inicial de desarrollo, como por ejemplo Rancho Redondo, Durazno, Pavas y Sanatorio Durán, los cuales derivan su material superficial de la última erupción del Irazú, demostrado con la asociación negativa altamente significativa determinada en estos suelos. Por lo tanto, este material de 10 años de edad se considera de un bajo grado de meteorización, lo cual se confirma con el análisis de disolución selectiva y de

absorción infrarroja de estas muestras. Con este aspecto están de acuerdo Yoshinaga y Aomine (171), Pineda (129) y otros autores (17, 19, 76).

En el análisis de la detección rápida del alofán, se empleó un pH de 7 y se estableció como criterio de selección a un pH superior a 9,5 la presencia de alofán; inferior a este pH, se considera evolución del material alofánico hacia estructuras más organizadas; esto se asigna en el Cuadro 10, presentando valores próximos a los suelos estudiados por otros investigadores (57, 63, 124).

Algunas muestras por este análisis (63), liberan iones de  $\text{OH}^-$  en cantidad apreciable, lo cual señala una estructura poco desarrollada que corresponde al alofán. Pero otras muestras estudiadas indican menor liberación de  $\text{OH}^-$ , lo que revela una evolución rápida de materiales a un estado de orden/desorden tendiente a paracristalino (semicristalino) (57). Por otra parte, esto puede deberse a la eliminación incompleta de la materia orgánica causada por su gran retención y por lo tanto, algunos grupos orgánicos se encuentran adicionados al alofán en una forma estable que no permite la liberación necesaria de  $\text{OH}^-$ . Otra suposición podría ser la de que el pH empleado no desprende los suficientes  $\text{OH}^-$  y que debe ser superior a 9, según Fieldes (63) para obtener resultados aceptables.

Los resultados del análisis de disolución selectiva indicados en el Cuadro 12 se encuentran entre los límites señalados por otros autores (85, 145).

Estos datos indican que a medida que las muestras se alejan



del volcán, poseen un menor porcentaje de material amorfo. Esto es obvio debido a que el factor viento permite que el material más grueso se encuentre próximo al volcán, el cual sufre una meteorización más lenta y en consecuencia, se localizan los suelos jóvenes; ocurriendo lo contrario, con el material más fino que es transportado a más distancia y que es más susceptible a la meteorización, y como tal resulta en los suelos más desarrollados. Este efecto es expresado en estudios de Soto (150), y Kanno et al (98); lo mismo se comprueba con la correlación altamente significativa, el estudio mineralógico y con los datos de análisis de espectrometría infrarroja.

En este mismo análisis se determinaron los óxidos "libres" de hierro, aluminio y silicio, señalados por el Cuadro 12, donde los valores de  $\text{SiO}_2$  libre tienden a aumentar con el grado de desarrollo del suelo, indicando que se pierden más rápido que los óxidos de aluminio y hierro, estando de acuerdo con lo expuesto por Besoaín (17) y que se confirma con la asociación positiva significativa del hierro en estos suelos.

Esto hace suponer que a medida que el material amorfo tiende a organizar su estructura es más bajo el contenido de  $\text{SiO}_2$  libre, mientras se incrementa el porcentaje de óxidos de hierro y aluminio. Es lógico, tal como lo reporta Besoaín (14), al considerar que la formación del alofán es rápida, de modo que seis o siete años de ocurrida la deposición, se puede encontrar alofán abundante en su forma "B".

## 5.6 Espectrofotometría infrarroja

Los diagramas de espectrofotometría infrarroja presentan bandas

amplias entre 3000 y 3710  $\text{cm}^{-1}$  características de material alofánico, con un máximo alrededor de 3440  $\text{cm}^{-1}$ . Estas bandas son debidas a vibraciones de los grupos de  $\text{OH}^-$  libres y estructurales (enlaces Si-OH y Al-OH) (8). La presencia de pequeños hombros a 3625, 3540  $\text{cm}^{-1}$  podría sugerir la existencia de gibbsita a causa de su frecuente asociación con el material alofánico o podrían indicar la organización de redes octaédricas, en su transformación a haloisita (17).

La banda a 1630  $\text{cm}^{-1}$  es atribuída a la deformación angular de la molécula H-O-H. Una banda alrededor de 1050  $\text{cm}^{-1}$  señala vibraciones de enlace Si-O. El alofán exhibe una banda amplia en las bajas frecuencias, alrededor de 1000  $\text{cm}^{-1}$ . El desplazamiento observado desde 1000 a 1050  $\text{cm}^{-1}$  puede deberse en la opinión de Kanno y colaboradores (98), a la polimerización de la sílice amorfa y el aluminio hexacoordinado ( $\text{Al}^{\text{VI}}$ ) hacía una estructura más ordenada. La banda a 1150  $\text{cm}^{-1}$  puede sugerir un comienzo de organización de silicatos de capa, posiblemente una forma elemental de metahaloisita (42).

Como es conocido, la existencia de una banda alrededor de 1430  $\text{cm}^{-1}$  puede ser debida a  $\text{CO}_2$ , moléculas orgánicas,  $\text{NH}_4^+$  o el mineral de silicato férrico amorfo, la hissingerita, que se ha definido como un isómero férrico del alofán. Es muy difícil determinar si la naturaleza de la banda a 1430  $\text{cm}^{-1}$  puede corresponder a hissingerita, pero considerando el modo de origen del alofán, su naturaleza no cristalina, y un medio de meteorización abundante en hierro, podría estimarse como posible el reemplazo de hierro por aluminio en la estructura primitiva para originar hissingerita (13, 76). En todo caso,

hay seguridad que las muestras estudiadas no tienen materia orgánica y carecen del ión  $\text{NH}_4^+$ . Esta banda a  $1430 \text{ cm}^{-1}$  ha sido comprobada en numerosas arcillas andosólicas y pudieran, en efecto, identificar el homólogo férrico del alofán, la hissingerita coincidiendo con el criterio de Kanno *et al.* (98), y Besoain y colaboradores (15). Por otra parte, el desplazamiento de la banda de 900 a  $1000 \text{ cm}^{-1}$  puede identificar la presencia de aluminio tetracoordinado ( $\text{Al}^{\text{IV}}$ ), asociado a vidrios volcánicos o a alofán elemental, de tipo B o AB, según el criterio de Fieldes (61, 64). Esta última banda asociada con aquélla a  $800 \text{ cm}^{-1}$ , puede indicar una fase discreta de sílice amorfa (vidrios), propia de enlaces Si-O-Si. La banda a  $795 \text{ cm}^{-1}$  se le atribuye a una fase de cuarzo, o a la alfa-cristobalita. La absorción a la frecuencia entre  $710\text{-}720 \text{ cm}^{-1}$  corresponde a enlaces de Si-O-Al, este último como aluminio hexacoordinado ( $\text{Al}^{\text{VI}}$ ) y la banda exhibida a  $540 \text{ cm}^{-1}$  podría deberse a la formación de una capa con  $\text{Al}^{\text{IV}}$  (114). El doblete de  $440$  y  $470 \text{ cm}^{-1}$  señala la superposición de capas octaédricas y tetraédricas. La banda de  $750 \text{ cm}^{-1}$  puede deberse a la presencia de gibbsita (17). Las diferentes bandas presentes entre  $500\text{-}700 \text{ cm}^{-1}$ , pueden indicar la existencia de pequeñas cantidades de haloisita, pero el diagrama a estas bajas frecuencias pierde precisión, y así no se puede dar una interpretación correcta. Además, se pueden observar diferentes bandas entre  $250$  a  $350 \text{ cm}^{-1}$  las cuales, en estas muestras no tienen significación.

Las características de la caolinita en altas frecuencias incluyen una serie de bandas alrededor de  $3700$ ,  $3660$ ,  $3630$ ,  $3450 \text{ cm}^{-1}$ , definida principalmente por la banda a  $3660 \text{ cm}^{-1}$  (42). La mayoría de

las haloisitas a estas frecuencias presentan sólo dos bandas a 3695 y 3620  $\text{cm}^{-1}$ . En bajas frecuencias se observa para la caolinita varias bandas alrededor de 1110, 1030, 1020, 1012, 915, 790  $\text{cm}^{-1}$ , siendo características la banda de 1030 y un doblete a 1020 y 1012  $\text{cm}^{-1}$ ; en estas frecuencias, se constatan en las haloisitas, que el doblete se funde en una banda alrededor de 1030  $\text{cm}^{-1}$ , de acuerdo con Besoain y colaboradores (15) y Hunt y colaboradores (89).

En el alofán las bandas características en altas y bajas frecuencias se presentan alrededor de 3460, 1630, 1020, 800 y 565  $\text{cm}^{-1}$ , coincidiendo con Calhoun y Carlisle (38) y Mejía y colaboradores (114).

Este análisis demuestra predominancia del alofán y que el contenido de minerales amorfos es menor en las muestras que se encuentran más alejadas del volcán, lo cual está estrechamente relacionada con la secuencia evolutiva de las cenizas volcánicas tanto en superficie como en profundo y concordando con investigaciones de otros autores (15, 42, 171).

## 5.7 Análisis mineralógico

El análisis mineralógico de algunas muestras (Rancho Redondo Profundo, Pavas Superficial y Profundo, Cot Profundo y La Rueda Profundo) señala la disminución del contenido de material grueso con el alejamiento del volcán; esto es indicativo de una avanzada meteorización en las muestras que se presentan a mayor distancia del volcán y que se le puede atribuir en parte a las condiciones ambientales, principalmente al factor viento que facilita el traslado de las partículas finas a un mayor radio de la boca del volcán.

Por la existencia de hiperstena se pueden considerar suelos provenientes de roca andesítica. Además, la presencia de este mineral y la augita corrobora el origen de roca básica de estos suelos.

## 6. CONCLUSIONES

- La CIC en muestras secas posee correlaciones positivas con los óxidos hidratados "libres" de silicio ( $r = 0,65$ ).
- La CIC de las muestras húmedas tienen asociaciones positivas con la materia orgánica ( $r = 0,50$ ), los óxidos hidratados "libres" de aluminio ( $r = 0,78$ ), el alofán ( $r = 0,73$ ) y los materiales amorfos ( $r = 0,61$ ).
- La CIC en las muestras sin materia orgánica correlaciona positivamente con los óxidos hidratados "libres" de aluminio ( $r = 0,76$ ) y el alofán ( $r = 0,71$ ).
- La CIC de estos suelos depende notablemente del pH empleado en las soluciones extractoras por la variabilidad presentada en los diferentes métodos.
- Las fracciones de la materia orgánica influyen respectivamente la CIC de los suelos estudiados, de acuerdo a los valores superiores en las muestras sin materia orgánica en comparación con las con materia orgánica en la mayoría de los métodos, probablemente por la presencia de inactividad en sitios de intercambio.
- Los valores de la CIC obtenidos por los métodos que usan cationes monovalentes son superiores a los divalentes, presentándose correlación entre métodos de cationes de igual valencia.
- Con los métodos de  $\text{NH}_4\text{OAc}$ ,  $\text{Ca}(\text{OAc})_2$ ,  $\text{Mg}(\text{OAc})_2$  y  $\text{BaCl}_2\text{-TEA}$ , se encontraron en muestras secas resultados superiores que en las húmedas, caso contrario sucedió con el método de  $\text{NaOAc}$ .

- Las cifras obtenidas para las bases cambiables con el método de la resina son superiores a los obtenidos con el método de  $\text{NH}_4\text{OAc}$ .
- La variabilidad en las cantidades de Al por el método de resina, señala que la CIC puede estar relacionada con la mineralogía, la cantidad de materia orgánica y el pH de estos suelos.
- La eliminación de la materia orgánica por oxidación con  $\text{H}_2\text{O}_2$  no asegura su remoción absoluta, pudiendo quedar como un complejo órgano-alofánico, una pequeña parte de ella con una CIC desconocida e indeterminable.
- De acuerdo a los resultados bajos obtenidos en la CIC de ciertas muestras, probablemente el componente alofánico de algunos de estos suelos presentan una estructura del alofán poco organizado (alofán "B").
- La CIC determinada por métodos convencionales (saturación, lavado, desaturación, etc.) no tiene un valor confiable en suelos que contienen alofán, como sede principal de la CIC por las siguientes contradicciones:
  - La CIC es dependiente del pH
  - Variación intrínseca del alofán
- Se determinó que el método de  $\text{Ca}(\text{OAc})_2$  es el recomendable para las muestras en seco, y el método de  $\text{NH}_4(\text{OAc})$  para las muestras en húmedo y los métodos de  $\text{NH}_4(\text{OAc})$  y  $\text{BaCl}_2$ -TEA se indican para las muestras sin materia orgánica.
- El contenido de ácidos fúlvicos es mayor en los suelos menos desarrollados.

- La cantidad de ácidos húmicos es superior en los suelos más desarrollados.
- La relación ácidos húmicos/ácidos fúlvicos aumentan con el grado de desarrollo del suelo.
- Los valores de la CIC de las fracciones de la materia orgánica son relativamente altos.
- Los porcentajes de los óxidos hidratados "libres" aumentan con el grado de desarrollo de los suelos.
- En las muestras húmedas los valores de los óxidos hidratados "libres" son superiores a los obtenidos en las muestras secas.
- El contenido del alofán aumenta con el grado de desarrollo del suelo.
- Los materiales amorfos disminuyen con la meteorización de la deposición de las cenizas recientes.
- En el análisis de espectrometría infrarroja se determina material alofánico en las muestras y la presencia de hissingerita (alofán férrico) en algunas de las mismas.
- El estudio mineralógico de algunas muestras indicó la presencia de hiperstena y augita, lo cual señala el origen andesítico de estos suelos.



## 7. RESUMEN

En el presente trabajo se trata de señalar la participación de los principales constituyentes de la fracción mineral (arcilla, silicatos amorfos, óxidos hidratados, etc.) y de la fracción orgánica (ácidos fúlvicos y húmicos), en la CIC de una secuencia de suelos de la región del Volcán Irazú.

Los suelos estudiados se consideran derivados de cenizas volcánicas, localizados al oeste del Volcán Irazú entre 2.400 msnm y 1.200 msnm. El clima de la zona se caracteriza por presentar temperatura media anual entre 17,55°C y 19,05°C, precipitación media anual de 1478,4 mm a 2548 mm. Según la clasificación de Holdridge pertenece a bosque muy húmedo montano, bosque húmedo montano bajo y bosque húmedo pre montano.

La capacidad de intercambio catiónico en muestras secas presenta correlaciones positivas con los óxidos hidratados "libres" de silicio. En las muestras húmedas la CIC tiene asociación positiva con la materia orgánica, los óxidos hidratados "libres" de aluminio, el alofán y los materiales amorfos. Con respecto a las muestras sin materia orgánica, la CIC presenta correlación positiva con los óxidos hidratados "libres" de aluminio y el alofán.

El análisis de regresión en la CIC de las muestras secas al aire manifiesta coeficientes lineales significativos entre los ácidos fúlvicos, óxidos hidratados "libres" y los materiales amorfos. En las muestras húmedas se observa que la CIC tiene significación con los ácidos fúlvicos y los materiales amorfos, y en las muestras sin

materia orgánica se determina significancia con los óxidos hidratados "libres" y materiales amorfos.

En forma general, los resultados de la CIC de las muestras sin materia orgánica son superiores a las muestras con materia orgánica (secas y húmedas), presumiéndose por la formación de complejo-organo-metálico que disminuye la CIC.

En la comparación de los datos de la CIC en las muestras secadas al aire y a humedad de campo, no se establece una tendencia definida en los valores obtenidos de este estudio.

La relación de los ácidos húmicos/ácidos fúlvicos aumenta con el grado de desarrollo del suelo.

Las fracciones de la materia orgánica están correlacionadas con los óxidos hidratados, el alofán y los materiales amorfos. En el análisis de regresión de las fracciones de la materia orgánica, se encontraron coeficientes lineales significativos con el alofán.

El contenido del alofán aumenta con el grado de desarrollo en estos suelos.

Los materiales amorfos disminuyen con la meteorización de las cenizas.

En el análisis de espectrometría infrarroja se determinó alofán en las muestras estudiadas y la existencia de hissingerita en algunas de ellas.

El análisis mineralógico de algunas muestras permitió apreciar hiperstena y augita, vidrios volcánicos y feldespatos. La presencia de la hiperstena y la augita señala el origen andesítico de estos suelos.

## 7a. SUMMARY

The present work attempts to determine the influence of the main mineral (clays, amorphous silicates, hydrous oxides, etc.) and organic fractions (fulvic and humic acids) in the cation exchange capacity of soils in a toposequence developed on volcanic ash from Irazu volcano.

The soils studied are considered to be derived from volcanic ash, situated to the west of the Irazu volcano, at elevations between 1,200 and 2,400 m above sea level. The area has a mean annual temperature ranging from 17.55°C to 19.05°C and the annual rainfall from 1478.4 mm to 2548 mm. According to Holdridge's classification of life zones, the area covers three zones: montane wet forest, lower montane moist forest and premontane moist forest.

Cation-exchange capacity of dry samples shows positive correlations with free hydrous silica. Moist samples show positive correlations with organic matter content, free hydrous aluminum oxides, allophane and amorphous materials. In regard to organic-matter free samples, positive correlations occur with free hydrous aluminum oxides and allophane.

Regression analysis on CEC of air-dry soils shows significant linear coefficients with fulvic acids, free hydrous oxides and amorphous materials. CEC was significantly correlated with fulvic acids and amorphous materials in moist samples. Organic-matter free samples had significant linear coefficients with free hydrous oxides and amorphous materials.

In general, CEC results of organic-matter free samples are higher than those with it (both dry and moist samples), probably due to the formation on an organo-mineral complex which reduces CEC.

It is not possible to find any trend in the values obtained when comparing CEC data of air-dry samples with moist samples.

The relation humic acids/fulvic acids increases with increasing degree of soil development.

Organic-matter fractions correlate with hydrous oxides, allophane and amorphous materials. Significant linear coefficients with allophane were found in a regression analysis of organic-matter fractions.

Allophane content increases with the degree of development in these soils.

Amorphous materials decrease with increasing weathering of ash.

All samples had allophane and some hisingerite as determined by infrared spectrometry.

Mineralogical analysis of sands in some samples shows that the dominant minerals are hypersthene and augite in the heavy fractions, and feldspars and volcanic glass in the light one, so that the ashes are andesitic.

## 8. LITERATURA CITADA

1. ADACHI, T. On the humus composition of volcanic ash soils in Koshima, Ibaragi Pref. I. Soil Science and Plant Nutrition 10: 88-89. 1964.
2. \_\_\_\_\_. On the humus composition of volcanic ash soils in Hokuriki, Sanin and Tokai Districts. VI. Studies on the humus of volcanic ash soils. Soil Science and Plant Nutrition 18(5): 202. 1972.
3. AHMAD, N. y PRASHAD, S. Dispersion, mechanical composition and fractionation of wet Indian volcanic yellow earth soils (Andepts). Journal of Soil Science 21(1):63-71. 1970.
4. AGUILERA, N. Suelos de ando; génesis, morfología y clasificación. Escuela Nacional de Agricultura, Chapingo, México. Serie de investigación no. 6. 1965. 12 p.
5. \_\_\_\_\_. Distribución geográfica y características de los suelos derivados de cenizas volcánicas de México. In Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina, Turrialba, C.R., 1969. Suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina. Turrialba, C.R., IICA, 1969. pp. A.6.1-12.
6. ALCAYAGA, A. Relaciones entre algunas características químicas y físicas de suelos derivados de cenizas volcánicas. Agricultura Técnica (Chile) 24:9-18. 1965.
7. ALFARO, A. Rocas volcánicas de Costa Rica. Boletín de Fomento (Costa Rica) 3(8):549-555. 1913.
8. AOMINE, S. y YOSHINAGA, M. Clay minerals of some well drained volcanic ash soils in Japan. Soil Science 79(5):349-358. 1955.
9. \_\_\_\_\_ y JACKSON, M. L. Allophane determination in ando soils by cation exchange capacity Delta Value. Soil Science Society of America Proceedings 23:210-214. 1959.
10. \_\_\_\_\_. Nitrogen fertility and humic matter of Chilean andosols. Soil Science and Plant Nutrition 18(2):105-113. 1972.
11. BEAR, F. E. Chemistry of the soil. 2 ed. American Chemical Society. Monograph series no. 160. 1964. 515 p.
12. BESOAIN, E. Esquema de las reacciones probables y productos que se forman durante la meteorización de las cenizas volcánicas en ambientes de humedad y drenaje adecuadas. (Sin publicar).

13. BESOAIN, E., GONZALEZ, S. y CASTRO, B. Probable existencia de hisingerita en suelos volcánicos chilenos. (Sin publicar).
14. \_\_\_\_\_. Mineralogía de las arcillas de algunos suelos volcánicos de Chile. *Agricultura Técnica (Chile)* 10(2):110-165. 1958.
15. \_\_\_\_\_, SERRATOSA, J. M. e HIDALGO, A. Espectros de absorción infrarroja de la fracción arcilla de suelos volcánicos de Chile. *Anales de Edafología y Agrobiología* 23:293-363. 1964.
16. \_\_\_\_\_. Mineralogía de las arcillas volcánicas. In *Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina*, Turrialba, C.R., 1969. *Suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina*. Turrialba, C.R., IICA, 1969. pp. B.1.1-17.
17. \_\_\_\_\_. *Mineralogía de suelos: curso*. Turrialba, C.R., IICA, 1970. 348 p.
18. BHANDARI, G. S., MASKINA, M. S. y RANDHAWA, N. S. A study of humic and fulvic fractions of some soils of different agro-climatic regions of the Erstwhile Punjab. *Geoderma* 3:239-245. 1969-70.
19. BIRRELL, K. S. y FIELDS, M. Allophane in volcanic ash soils. *Journal of Soil Science* 3(2):156-167. 1952.
20. \_\_\_\_\_. The adsorption of cations from solution by allophane in relation to their effective size. *Journal of Soil Science* 12:307-316. 1961.
21. \_\_\_\_\_. Ion fixation by allophane. *New Zealand Journal of Science* 4(3):393-430. 1961.
22. \_\_\_\_\_. Some properties of volcanic ash soils. In *Meeting on the Classification and Correlation of Soils from Volcanic Ash*, Tokyo, 1964. FAO. *World Soil Resources Report no. 14*. 1964. pp. 74-81.
23. BLACK, C. A. *Soil-plant relationships*. 2 ed. New York, Wiley, 1968. 792 p.
24. BLAKE, G. R. Bulk density. In Black, C. A. et al, eds. *Methods of soil analysis*. Madison, Wis., American Society of Agronomy, 1965. pp. 374-390.
25. \_\_\_\_\_. Particle density. In Black, C. A. et al, eds. *Methods of soil analysis*. Madison, Wis., American Society of Agronomy, 1965. pp. 371-373.

26. BLASCO LAMENCA, M. Características químicas de los suelos volcánicos de Nariño, Colombia. Instituto Tecnológico Agrícola. Publicación no. 20. 1969. p. irr.
- Presentado al Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas, Turrialba, Costa Rica, 1969.
27. BORNEMISZA, E. Conceptos modernos de acidez del suelo. Turrialba (Costa Rica) 15(1):20-24. 1965.
28. \_\_\_\_\_, LAROCHE, F. A. y FASSBENDER, H. W. Effect of liming on some chemical characteristics of a Costa Rican latosol. Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings 27:219-226. 1967.
29. \_\_\_\_\_.e IGUE, K. Oxidos libres de hierro y aluminio en suelos tropicales. Turrialba (Costa Rica) 17(1):23-30. 1967.
30. \_\_\_\_\_.y PINEDA, R. Minerales amorfos y mineralización de nitrógeno en suelos derivados de cenizas volcánicas. In Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina, Turrialba, C.R., 1969. Suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina. Turrialba, C.R., IICA, 1969. pp. B.7.1-7.
31. \_\_\_\_\_.y MORALES, J. C. Soil chemical characteristics of recent volcanic ash. Soil Science Society of America Proceedings 33:528-530. 1969.
32. \_\_\_\_\_. Extraction of anions and cations from recent volcanic ash. Soil Science Society of America Proceedings 35(3):506-507. 1971.
33. BOUYOUCOS, C. J. Recalibration of hydrometer method for making mechanical analysis of soils. Agronomy Journal 43(9):434-438. 1951.
34. BOWER, C. A., REITEMEIER, R. F. y FIREMAN, M. Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. Soil Science 73(4):9-17. 1952.
35. BREMNER, J. M. Total nitrogen. In Black, C. A. et al, eds. Methods of soil analysis. Madison, Wis., American Society of Agronomy, 1965. pp. 1149-1178.
36. BRITISH DRUG HOUSES. Ion exchange resins. 4 ed. Poole, Eng., s.f. 64 p.

37. BROADBENT, F. E., JACKMAN, R. H. y McNICOLL, J. Mineralization carbon and nitrogen in some New Zealand allophane soils. *Soil Science* 98(2):113-128. 1964.
38. CALHOUN, F. G. y CARLISLE, V. W. Infrared spectra of selected Colombian andosols. *Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings* 31:157-161. 1971.
39. \_\_\_\_\_, CARLISLE, V.W. y LUNA, C. Properties and genesis of selected Colombian andosols. *Soil Science Society of America Proceedings* 36(3):480-495. 1972.
40. COLEMAN, N. T. y HARWARD, M. E. The heats of neutralization of acid clays and cation exchange resins. *Journal of the American Chemical Society* 73(3):6045-6046. 1953.
41. \_\_\_\_\_, WEED, S. B. y McCRAKEN, R. J. Cation-exchange capacity and exchangeable cations in Piedmont soils of North Carolina. *Soil Science Society of America Proceedings* 23:146-149. 1959.
42. COLMET-DAAGE, F. et al. Caracteristiques de quelques sols d'Equator derives de cendres volcaniques. III. Comparision de l'evolution de quelques sols des regions tropicales chaudes et temperées froides d'altitude. *Cahiers ORSTOM (Serie Pedologie)* 7(4):495-560. 1962.
43. \_\_\_\_\_, et al. Dispersion et études des fractions fines des sols a allophane des Antilles et d'Amérique Latine. *Cahiers ORSTOM (Serie Pedologie)* 10(2):169-191. 1972.
44. COSTA, F. et al. Influencia de la materia orgánica de origen diferente sobre la movilidad de hierro y manganeso en suelos calizos. In *Symposium on the Use of Isotopes and Radiation in Soil Organic-Matter Studies, 1968. Isotopes and radiation in soil organic-matter studies; proceedings. Vienna, IAEA, 1968. pp. 433-452.*
45. CHAPMAN, H. D. Cation-exchange capacity. In Black, C. A. et al, eds. *Methods of soil analysis. Madison, Wis., American Society of Agronomy, 1965. pp. 891-901.*
46. DAVIDTZ, F. C. y SUMMER, M. E. Blocked charges on clay minerals in subtropical soils. *Journal of Soil Science* 16:270-274. 1965.
47. DAY, P. R. Particle fractionation and particle size analysis. In Black, C. A. et al, eds. *Methods fo soil analysis. Madison, Wis., American Society of Agronomy, 1965. pp. 545-567.*



48. DeMUMBRUM, L. E. y CHESTER, G. Isolation and characterization of some soil allophane. *Soil Science Society of America Proceedings* 28(3):355-359. 1964.
49. DE VILLIERS, J. M. The problem of quantitative determination of allophane in soil. *Soil Science* 112(1):2-7. 1971.
50. DIAZ-ROMEU, R. y BALERDI, F. Determinación de la capacidad de intercambio de cationes del suelo. Turrialba, C.R., IICA, 1967. 3 p.
51. DONDOLI, G. y TORRES, J. A. Estudio geoagronómico de la región oriental de la Meseta Central. San José, Ministerio de Agricultura e Industrias, 1954. 180 p.
52. DOW CHEMICAL COMPANY. Dowex: ion exchange. Midland, Mich., 1964. 80 p.
53. DUDAL, R. Correlation of soils derived from volcanic ash. In Meeting on the Classification and Correlation of Soils from Volcanic Ash, Tokyo, 1964. FAO. World Soil Resources Report no. 14. 1964. pp. 134-137.
54. DURIE, R. A. y MURRAY, A. A study of the infrared absorption spectra of soils. *Australian Journal of Applied Science* 8:335-338. 1957.
55. EGAWA, T. Mineralogical properties of volcanic ash soils in Japan. In Meeting on the Classification and Correlation of Soils from Volcanic Ash, Tokyo, 1964. FAO. World Soil Resources Report no. 14. 1964. pp. 89-93.
56. ENSMINGER, L. E. y GIESEKING, J. E. The absorption of proteins by montmorillonitic clays and its effect on base-exchange capacity. *Soil Science* 51:125-132. 1941.
57. ESPINOZA, G. W. Detección rápida de alofán en suelos de Ñuble. *Agricultura Técnica (Chile)* 29(3):75-80. 1969.
58. FERNANDEZ CALDAS, E. y GUTIERREZ JERES, F. Estudio de la fracción orgánica en andosuelos de la zona húmeda de Tenerife. *Anales de Edafología y Agrobiología* 30(7-8):737-749. 1971.
59. \_\_\_\_\_. La materia orgánica en andosuelos de diferentes regiones climáticas de Tenerife. *Anales de Edafología y Agrobiología* 30(7-8):751-760. 1971.
60. FIELDS, M. y SWINDALE, L. D. Chemical weathering of silicates in soil formation (Sumario). *Soils and Fertilizers* 18:214. 1955.

61. FIELDS, M. Clay mineralogy of New Zealand soils. II. Allophane and related mineral colloids. *New Zealand Journal of Science and Technology (Section B)* 37:336-350. 1955.
62. \_\_\_\_\_, WALKER, I. K. y WILLIAMS, P. P. Clay mineralogy of New Zealand soils. III. Infrared absorption spectra of soil clays. *New Zealand Journal of Science and Technology (Section B)* 38: 31-43. 1966.
63. \_\_\_\_\_ y PERROT, K. W. The nature of allophane in soils. III. Rapid field and laboratory test for allophane. *New Zealand Journal of Science* 9(3):623-629. 1966.
64. \_\_\_\_\_, FURKET, R. J. y WELLS, N. Rapid determination of constituents of whole soils using infrared absorption. *New Zealand Journal of Science* 15(4):615-627. 1972.
65. FLACH, K. The classification of ash derived soil in the U.S. of America. In *Meeting on the Classification and Correlation of Soils from Volcanic Ash*, Tokyo, 1964. FAO. *World Soil Resources Report no. 14*. 1964. pp. 111-114.
66. FORSYTH, W. G. L. The characterization of the humic complexes of soil organic matter. *Journal of Agricultural Science* 37:132-138. 1947.
67. FORSYTHE, W., GAVANDE, S. A. y GONZALEZ, M. A. Propiedades físicas de suelos derivados de cenizas volcánicas considerando algunos suelos de América Latina. In *Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina*, Turrialba, C.R., 1969. *Suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina*. Turrialba, C.R., IICA, 1969. pp. B.3.1-7.
68. \_\_\_\_\_. *Manual de laboratorio de física de suelos*. Turrialba, C.R., IICA, 1972. 217 p.
69. FREDERICKSON, L. D. Characterization of hydrated aluminas by infrared spectroscopy. *Analytical Chemistry* 26:1883-1885. 1954.
70. FRINK, C. R. The effect of wash solvents on cation exchange capacity measurements. *Soil Science Society of America Proceedings* 28:506-511. 1964.
71. FUENTES FLORES, R. Comportamiento de la capacidad de intercambio catiónico en algunos suelos ácidos de origen volcánico. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., IICA, 1971. 107 p.
72. FUENTES MADRIZ, G. Evaluación de los suelos de la zona oeste del cantón de Oreamuno. Tesis Ing. Agr. San José, Universidad de Costa Rica, 1972. 81 p.

73. GILTRAP, D. J. A comparison of direct and indirect cation-exchange procedures for allophanic and non-allophanic soils. *New Zealand Journal of Science* 15(4):421-434. 1972.
74. \_\_\_\_\_. Determination of cation-exchange capacity of soils by indirect estimation of reference cation retention. *New Zealand Journal of Science* 15(2):156-164. 1972.
75. GOH, K. M. The application on infrared spectroscopy to soil organic matter investigations. *New Zealand Soil News* 19:247-260. 1970.
76. GONZALEZ MARTINEZ, S. Caracterización de la fracción arcilla en algunos suelos derivados de cenizas volcánicas de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., IICA, 1972. 68 p.
77. GREENLAND, D. J. Interaction between clays and organic compounds in soils. II. Adsorption of soil organic compounds and its effect on soil properties. *Soils and Fertilizers* 28(6):521-532. 1965.
78. \_\_\_\_\_. Interaction between humic and fulvic acids and clays. *Soil Science* 11(1):34-41. 1971.
79. GRIM, R. E. *Clay mineralogy*. New York, McGraw-Hill, 1953. 384 p.
80. GUEDES, O. J. y PECORA, E. J. Alófana en un perfil de suelo de Concordia, Entre Ríos. *Revista de Investigaciones Agropecuarias (Serie 3: Clima y Suelo) (Argentina)* 6(5):71-87. 1969.
81. GUYOT, J. Mesure des surfaces spécifiques des argiles par adsorption. *Anales Agronomiques* 20(4):333-359. 1969.
82. HARADA, Y. y WADA, K. Release and uptake of protons by allophanic soils in relation to their CEC and AEC. *Soil Science and Plant Nutrition* 19(2):73-82. 1973.
83. HARRIS, S. A. et al. Principales zonas de suelos de Costa Rica. Trad. de A. Alvarado H. Lawrence, Universidad de Kansas, 1969. 9 p.  
Presentado en el X Congreso Latinoamericano de Química, San José, 1969.
84. HARWARD, M. E. y COLEMAN, N. T. Some properties of  $H^+$  and  $Al^+$  clays and exchange resins. *Soil Science* 78(3):181-188. 1954.
85. HASHIMOTO, L. y JACKSON, M. L. Rapid dissolution of allophane and kaolinite-halloysite after dehydration. In *National Conference on Clays and Clay Minerals, 7th, Washington, D.C., New York*, Pergamon Press, 1960. pp. 102-113.

86. HELFFERICH, F. Ion exchange. New York, McGraw-Hill, 1962. 624 p.
87. HELLING, C. J., CHESTERS, G. y COREY, R. B. Contribution of organic matter and clay to soil cation exchange capacity as affected by the pH of the saturating solution. *Soil Science Society of America Proceedings* 28(4):507-514. 1966.
88. HOLDRIDGE, L. R. et al. Forest environments in tropical life zones; a pilot study. Oxford, Pergamon Press, 1971. 747 p.
89. HUNT, J. M., WISHERD, M. P. y BONHAM, L. C. Infrared adsorption spectra of minerals and the inorganic compounds. *Analytical Chemistry* 22:1473-1497. 1950.
90. JACKMAN, R. H. Organic phosphorus in New Zealand soils under pasture. II. Relation between organic phosphorus content and soil characteristics. *Soil Science* 79:293-299. 1955.
91. JACKSON, M. L. Free oxides, hydroxides and amorphous aluminosilicates. In Black, C. A. et al., eds. *Methods of soil analysis*. Madison, Wis., American Society of Agronomy, 1965. pp. 578-603.
92. \_\_\_\_\_. *Soil chemical analysis; advanced course*. Madison, Wis., University of Wisconsin, 1966. 991 p.
93. JAPAN. MINISTRY OF AGRICULTURE AND FORESTRY. Volcanic ash soils in Japan. Tokyo, 1964. p. irr.
94. JARAMILLO, C. L. R. Caracterización de algunos latosoles de Mesoamérica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C. R., IICA, 1969. 233 p.
95. KAMPRATH, E. J. y WELCH, C. D. Retention and cation-exchange properties of organic matter in Coastal Plain soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 26(3):263-265. 1962.
96. KANEHIRO, Y. y SHERMAN, G. Effect of dehydration-rehydration on cation exchange capacity of Hawaiian soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 20:341-344. 1956.
97. KANNO, I. Genesis and classification of humic allophane soils in Japan. In International Society of Soil Science. Transactions of Joint Meeting IV and V. New Zealand, International Soil Conference, 1962. pp. 422-427.
98. \_\_\_\_\_, ONIKURA, Y. e HIGASHI, T. W. Weathering and clay mineralogical characteristics of volcanic ashes and pumices in Japan. In International Congress of Soil Science, 9., Adelaide, Australia, 1968. *Transactions. Sydney, Australia, International Society of Soil Science, 1968. v.3, pp. 111-121.*

99. KILMER, V. L. The estimation of free iron oxides in soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 24(5):420-421. 1960.
100. KITAGAWA, Y., KYUMA, K. y KAWAGUEHI, K. Clay mineral composition of some volcanogenesis soils in Indonesia and the Philippines. *Soil Science and Plant Nutrition* 19(3):147-159. 1973.
101. KNOX, E. G. y MALDONADO P., F. Soils from volcanic ash excursion from Turrialba to Volcan Irazu. In *Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina*, Turrialba, Costa Rica, 1969. *Suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina*. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1969. pp. A.8.1-12.
102. KOB0, K. Properties of volcanic ash soils. In *Meeting on the Classification and Correlation of Soils from Volcanic Ash*, Tokyo, 1964. *FAO. World Soil Resources Report no. 14*. 1964. pp. 71-73.
103. KOSAKA, J., HONDA, C. e ISEKI, A. Transformation of humus in upland soils, Japan. *Soil Science and Plant Nutrition* 8:23-28. 1962.
104. LAI, S. y SWINDALE, L. D. Chemical properties of allophane from Hawaiian and Japanese soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 33(5):804-808. 1969.
105. LE ROUX, J. y DE VILLIERS, J. M. Cation exchange capacity and degree of saturation with metal cations of highly weathered soils. *South African Journal of Agricultural Science* 9:31-42. 1966.
106. LUZURIAGA T., C. Propiedades morfológicas, físicas y químicas, y clasificación de seis andosoles de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1970. 159 p.
107. MACIAS, M. Propiedades morfológicas, físicas, químicas y clasificación de ocho latosoles de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1969. 193 p.
108. MALDONADO P., F. A. Study of a climo-toposequence on soils developed on volcanic ash deposits in Ecuador. Thesis Ph.D. Ghent, Belgium, State University of Ghent, 1973. 262 p.
109. MANNIX, J. Redescipción preliminar de suelos volcánicos del macizo del Irazú. San José, Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1966. 8 p.
110. MARTINI, J. A. Algunas consideraciones sobre suelos de Centroamérica, referencia especial al trópico húmedo. *Fitotecnia Latinoamericana (Costa Rica)* 6(1):127-147. 1969.

111. MARTINI, J. A. Distribución geográfica y características de los suelos derivados de cenizas volcánicas en Centro América. In Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina, Turrialba, Costa Rica, 1969. Suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1969. pp. A.5.1-17.
112. MEETING ON THE CLASSIFICATION AND CORRELATION OF SOILS FROM VOLCANIC ASH, TOKYO, 1964. Report. FAO. World Soil Resources Report no. 14. 1964. 169 p.
113. MEHRA, C. P. y JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In National Conference on Clays and Clay Minerals, 7th, Washington, D.C., 1960. Clays and clay minerals. New York, Pergamon Press, 1960. pp. 317-327.
114. MEJIA, G., KOHNKE, J. y WHITE, J. L. Clay mineralogy of certain soils of Colombia. Soil Science Society of America Proceedings 32:665-670. 1968.
115. MITCHELL, B. D. y MCKENZIE, R. C. Removal of free iron oxides from clays. Soil Science 77(3):173-184. 1954.
116. \_\_\_\_\_, FARMER, V. C. y MCHARDY, W. G. Amorphous inorganic materials in soils. Advances in Agronomy 16:327-383. 1964.
117. MIYAUCHI, N. y AQMINE, S. Does "Allophane" exist in Japanese volcanic ash soils. Soil Science and Plant Nutrition 10(5):199-203. 1964.
118. MORELLI, M. Influencia da calogem no complexo de troca e movimento de calcio e magnesio em um andosol de Costa Rica. Tese Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1971. 56 p.
119. MORTENSEN, J. L., ANDERSON, L. D. y WHITE, J. L. Infrared spectrometry. In Black, C. A. et al, eds. Methods of soil analysis. Madison, Wis., American Society of Agronomy, 1965. pp. 743-770.
120. MULLER, L. et al. Estudio del fósforo en suelos de América Central. I. Características físicas y químicas de los suelos estudiados. Turrialba (Costa Rica) 18(4):319-332. 1968.
121. MUNSELL COLOR COMPANY. Munsell soil color charts. Baltimore, Md., 1954. 20 p.
122. OHMASA, M. Scope of volcanic soils; their extension and distribution. In Meeting on the Classification and Correlation of Soils from Volcanic Ash, Tokyo, 1964. FAO. World Soil Resources Report no. 14. 1964. pp. 7-8.

123. OLPHEN, H. VAN. Amorphous clay minerals. *Science* 171:91-92. 1971.
124. PALENCIA ORTIZ, J. A. Caracterización de algunos suelos derivados de cenizas volcánicas de Centroamérica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1969. 168 p.
125. PALMA, G. Uso de resinas de intercambio iónico para evaluar la disponibilidad de fósforo en suelos. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1970. 78 p.
126. PASLUK, S. y CARSON, J. A. Evaluation of methods for determination of exchange acidity in soils. *Journal of Soil Science* 43:325-335. 1963.
127. PEECH, M., COWAN, R. L. y BAKER, S. H. A critical study of the  $BaCl_2$ -Triethanolamine and the ammonium acetate methods for determining the exchangeable hydrogen contents of soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 26:37-40. 1962.
128. PINEDA, J. R. Alófana. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1968. 30 p.
129. \_\_\_\_\_ . Mineralización de nitrógeno orgánico en algunos suelos de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1969. 79 p.
130. PLA SENTIS, I. Revisión y discusión de métodos rápidos para determinar capacidad total de intercambio de cationes de los suelos. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela* 4(3):18-28. 1968.
131. POSNER, A. M. The humic acids extracted by various reagents from a soil. *Journal of Soil Science* 17:65-78. 1966.
132. PRATT, P. F. y GROVER, B. L. Monovalent-divalent cation-exchange equilibrium in soils in relation to organic matter and type of clay. *Soil Science Society of America Proceedings* 28:32-35. 1964.
133. QUANTIN, P. Les andosols. *Cahiers ORSTOM (Série Pedologie)* 10(3):273-301. 1972.
134. RICH, C. I. Removal of excess salt in cation-exchange-capacity determinations. *Soil Science* 93:87-94. 1962.
135. RICO, M. Report on soils of volcanic ash origin in El Salvador. In *Meeting on the Classification and Correlation of Soils From Volcanic Ash, Tokyo, 1964*. FAO. World Soil Resources Report no. 14. 1964. pp. 23-29.

136. RIOS GOMEZ, V. Movimiento de  $^{45}\text{Ca}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{85}\text{Sr}$  y  $^{185}\text{N}$  en cuatro suelos de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1969. 81 p.
137. ROBERT, K. y FRANCIS, C. Principles of deionization with ion exchange resins. In Nachod, F. C. y Schubert, J., eds. Ion exchange technology. New York, Academic Press, 1956. pp. 95-117.
138. RODRIGUEZ SANCHIDRIAN, J. Estudio comparativo de los óxidos libres de hierro y aluminio y sílice en algunos suelos españoles. Anales de Edafología y Agrobiología 31(7-8):515-522. 1972.
139. ROSS, C. S. y KERR, P. F. Halloysite and allophane. U.S. Department of the Interior. Geological Survey Professional Paper no. 185G. 1934. pp. 135-148.
140. SADZAWKA, M., MELENDEZ, E. y AOMINE, S. The pH of Chilean volcanic ash soils 'Trumaos', Soil Science and Plant Nutrition 18(5): 191-197. 1972.
141. SAIZ DEL RIO, J. F. y BORNEMISZA, E. Análisis químico de suelos; método de laboratorio para diagnóstico de fertilidad. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1961. 107 p.
142. SALMON, J. E. y HALE, D. K. Ion exchange: a laboratory manual. London, Butterworths, 1959. 136 p.
143. SANCHEZ CALVO, M. DEL C. Alofán y otros coloides en las arcillas de Braunlehn y sus alteraciones en las Canarias occidentales. I. Análisis químico, A.T.D. y rayos X. Anales de Edafología y Agrobiología 20:189-208. 1961.
144. SCHALSCHA, E. B. et al. Effect of drying on volcanic ash soils in Chile. Soil Science Society of America Proceedings 29: 481-482. 1965.
145. SEGALIN, P. Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certain sols a hydroxydes tropicaux. Cahiers ORSTOM (Serie Pedologie) 6(1):105-126. 1968.
146. SHERMAN, G. D. et al. The role of the amorphous fraction in the properties of tropical soils. Agrochimica 8(2):146-163. 1964.
147. \_\_\_\_\_. Summary of the discussions. In Meeting on the Classification and Correlation of Soils from Volcanic Ash, Tokyo, 1964. FAO. World Soil Resources Report no. 14. pp. 139-143.
148. SHOJI, S. y MASAU, J. Amorphous clay minerals of recent volcanic ash soils in Hokkaido. I. Soil Science and Plant Nutrition 15(4):161-168. 1969.



149. SKEEN, J. B. y SUMNER, M. E. Exchangeable aluminium. I. The efficiency of various electrolytes for extracting aluminium from acid soils. *South African Journal of Agricultural Science* 10(1):3-10. 1967.
150. SOTO, C. Estudio de la concentración y distribución de los micronutrientes en un transecto de Nicaragua. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1973. 139 p.
151. STEEL, R. y TORRIE, J. Principles and procedures of statistics. New York, McGraw-Hill, 1960. 481 p.
152. STEVENSON, F. J. Chemical nature of the nitrogen in the fulvic fraction of soil organic matter. *Soil Science Society of America Proceedings* 24:472-477. 1960.
153. SWINDALE, L. D. y SHERMAN, G. D. Hawaiian soils from volcanic ash. In *Meeting on Classification and Correlation of Soils from Volcanic Ash*, Tokyo, 1964. FAO. World Soil Resources Report no. 14. 1964. pp. 36-49.
154. \_\_\_\_\_. Propiedades de los suelos de cenizas volcánicas. In *Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina*, Turrialba, Costa Rica, 1969. Suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1969. pp. B.10.1-9.
155. TAN, K. H. The andosols in Indonesia. In *Meeting on Classification and Correlation of Soils from Volcanic Ash*, Tokyo, 1964. FAO. World Soil Resources Report no. 14. 1964. pp. 30-35.
156. THORNBURY, W. D. Principios de geomorfología. 2 ed. Buenos Aires, Kapelusz, 1966. 643 p.
157. THORPE, J. y SMITH, G. D. Higher categories of soil classification: order, suborder and great soil group. *Soil Science* 67: 117-126. 1949.
158. TOKUDOME, S. y KANNO, I. Characteristic humus in humic allophane soils of Japan: preliminary report (Sumario). *Soils and Fertilizers* 28:84. 1965.
159. \_\_\_\_\_ y KANNO, I. Nature of the humus of humic allophane soil in Japan. II. Some physico-chemical properties of humic and fulvic acids. *Soil Science and Plant Nutrition* 11(5):1-8. 1965.
160. VALDES, A. Distribución geográfica y características de los suelos derivados de cenizas volcánicas de Chile. In *Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina*, Turrialba, Costa Rica, 1969. Suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1969. pp. A.1.1-14.

161. VARGAS V., O. y TORRES, J. A. Estudio preliminar de suelos de la región occidental de la Meseta Central. San José, Ministerio de Agricultura e Industrias, 1958. 64 p.
162. VIVES, L. Tabulación para uso agrícola de los datos climáticos de Costa Rica. San José, Universidad de Costa Rica, Facultad de Agronomía, 1971. 222 p.
163. VOLTZ, M. K. Gefüge- und Strukturuntersuchungen an Vulkanogenen Edaphoiden. In International Working Meeting on Soil Micro-morphology, 2., Arnhem, The Netherlands, 1964. Soil micro-morphology. Ed. by A. Jongerius. Amsterdam, Elsevier, 1964. pp. 139-149.
164. WADA, K. y ATAKA, H. Ion-uptake phenomena of allophane. Soil Science and Plant Food 4(1):12-18. 1958.
165. \_\_\_\_\_, e INOUE, T. Retention of humic substances derived from rotted clover leaves in soil containing montmorillonite and allophane. Soil Science and Plant Nutrition 13(1):9-16. 1967.
166. \_\_\_\_\_, y HARADA, Y. Effects of salt concentration and cation species on the measure cation-exchange capacity of soils and clays. In International Clay Conference, Tokyo, 1969. Proceedings. Jerusalem, Israel Universities Press, 1969. v.1, pp. 561-571.
167. \_\_\_\_\_, y GREENLAND, D. S. Selective dissolution and differential infrared spectroscopy characterization of amorphous constituents in soil clays. Clay Minerals 8:241-254. 1970.
168. WEAVER, R. M., SYERS, J. K. y JACKSON, M. L. Determination of silica in citrate-bicarbonate dithionite extracts of soils. Soil Science Society of America Proceedings 32(4):497-501. 1968.
169. WEYL, R. Die Geologie Mitterlamerikas. Berlin-Nikolassee, Gebr. Borntraeger, 1961. 226 p. (Beitrage zur regionalen Geologie der Erde, Bd. 1).
170. WRIGHT, A. C. S. The andosols or humic allophane soils of South America. In Meeting on the Classification and Correlation of Soil from Volcanic Ash, Tokyo, 1964. FAO. World Soils Resources Report no. 14. 1964. pp. 9-22.
171. YOSHINAGA, N. y AOMINE, A. Allophane in some ando soils. Soil Science and Plant Nutrition 8(2):6-13. 1962.
172. \_\_\_\_\_, y AOMINE, A. Imogolite in some ando soils. Soil Science and Plant Nutrition 8(3):22-29. 1962.

173. YOSHINAGA, N. Chemical composition and thermal data of allophanes from ando soils and weathered pumices. *Soil Science and Plant Nutrition* 12(2):1-8. 1966.
174. YUAN, T. L. y FISKELL, J. G. A. Aluminum from some Florida soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 23(3):202-205. 1959.
175. \_\_\_\_\_, GAMMON JUNIOR, N. y LEIGHTY, R. Relative contribution of organic and clay fractions to cation-exchange capacity of sandy soils from several soil groups. *Soil Science* 104(2): 123-128. 1967.
176. ZA VALETA, A. Distribución geográfica y características de los suelos derivados de cenizas volcánicas del Perú. In Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina, Turrialba, Costa Rica, 1969. Suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1969. pp. A.2.1-10.

9. APENDICE

Cuadro 1. Determinación de textura en algunos suelos estudiados por el método de dispersión de Ahmad y Prashad\*.

Muestras	Altura Km	Arena %	Limo %	Arcilla %	Textura %
RR <sub>1</sub>	2,00	93,80	5,05	1,15	Arenoso
RR <sub>2</sub>	2,00	61,00	33,00	6,00	Arenoso-francoso
D <sub>1</sub>	1,60	83,00	15,50	1,50	Areno-francoso
D <sub>2</sub>	1,60	61,00	35,50	3,50	Franco-arenoso
SD <sub>1</sub>	2,40	69,00	25,00	6,00	Franco-arenoso
SD <sub>2</sub>	2,40	57,00	32,00	11,00	Franco-arenoso
P <sub>1</sub>	2,40	59,00	32,00	9,00	Franco-arenoso
P <sub>2</sub>	2,40	62,00	28,00	10,00	Franco-arenoso

\* Se utiliza como dispersante nitrato de zirconio y ultrasonido como separación de las partículas del suelo.

Cuadro 2. Otras propiedades físicas de los suelos superficiales y subsuperficiales estudiados.

MUESTRA	Humedad		Espacio		Porosidad		SECO		HUMEDO	
	gravi- métrica %	Volumé- trica %	aéreo %	total %	COLOR*	COLOR*	COLOR*	COLOR*		
RR <sub>1</sub>	9,98	14,21	34,43	47,60	10YR 3/1	Gris muy oscuro	10YR 2/1	Negro		
RR <sub>2</sub>	33,67	34,02	24,05	59,24	10YR 4/2	Pardo grisáceo oscuro	10YR 2/2	Pardo muy oscuro		
D <sub>1</sub>	12,28	14,52	42,44	57,41	10YR 4/1	Gris oscuro	10YR 2/2	Pardo muy oscuro		
D <sub>2</sub>	53,35	43,13	23,75	66,88	10YR 4/3	Pardo oscuro	10YR 3/2	Pardo grisáceo muy oscuro		
SD <sub>1</sub>	16,95	23,18	25,99	49,17	10YR 3/1	Gris muy oscuro	10YR 2/1	Negro		
SD <sub>2</sub>	28,82	33,05	22,34	55,38	10YR 4/3	Pardo oscuro	10YR 2/1	Negro		
P <sub>1</sub>	20,01	22,47	34,98	57,45	10YR 3/2	Pardo grisáceo muy oscuro	10YR 2/2	Pardo muy oscuro		
P <sub>2</sub>	34,18	28,78	39,05	67,84	10YR 4/2	Pardo grisáceo oscuro	10YR 2/2	Pardo muy oscuro		
Ct <sub>1</sub>	52,94	54,18	2,21	56,38	10YR 4/2	Pardo grisáceo oscuro	10YR 2/2	Pardo muy oscuro		
Ct <sub>2</sub>	50,04	45,87	16,79	62,66	10YR 4/2	Pardo grisáceo oscuro	10YR 2/2	Pardo muy oscuro		
CH <sub>1</sub>	37,72	45,35	44,47	57,38	10YR 4/3	Pardo oscuro	10YR 2/2	Pardo muy oscuro		
CH <sub>2</sub>	39,65	49,66	2,63	51,56	10YR 4/3	Pardo oscuro	10YR 2/2	Pardo muy oscuro		
Cd <sub>1</sub>	44,45	48,50	7,37	55,87	10YR 3/3	Pardo muy oscuro	10YR 2/2	Pardo muy oscuro		
Cd <sub>2</sub>	44,22	48,36	11,17	58,59	10YR 5/4	Pardo amarillento	10YR 2/2	Pardo muy oscuro		
LR <sub>1</sub>	49,60	44,53	14,11	59,51	10YR 4/1	Pardo grisáceo oscuro	10YR 2/1	Negro		
LR <sub>2</sub>	38,45	41,48	14,80	56,82	10YR 4/1	Pardo grisáceo oscuro	10YR 2/2	Pardo muy oscuro		

\* Munsell (121)

Cuadro 3. CIC por el método de resina.

Muestra	Seco meq/100 g	Húmedo meq/100 g	Sin M0 meq/100 g
RR <sub>1</sub>	16,06	23,01	20,07
RR <sub>2</sub>	25,38	29,13	54,04
D <sub>1</sub>	16,26	23,08	22,60
D <sub>2</sub>	27,47	25,33	52,48
SD <sub>1</sub>	16,77	22,55	23,06
SD <sub>2</sub>	25,37	32,84	29,86
P <sub>1</sub>	25,98	33,94	32,23
P <sub>2</sub>	26,67	30,56	43,38
Ct <sub>1</sub>	35,58	31,56	47,02
Ct <sub>2</sub>	26,85	23,92	51,59
CH <sub>1</sub>	26,07	25,85	38,88
CH <sub>2</sub>	21,91	22,61	38,76
Cd <sub>1</sub>	24,85	27,12	39,33
Cd <sub>2</sub>	23,03	23,50	41,69
LR <sub>1</sub>	23,79	23,93	41,71
LR <sub>2</sub>	22,26	19,38	33,33

Cuadro 4. Cationes cambiables determinados por el método de resina en los suelos superficiales y subsuperficiales.

Mues- tra	SECAS meq/100 g						HUMEDAS meq/100 g						SIN MATERIA ORGANICA meq/100 g					
	Na	K	Ca	Mg	Mn		Na	K	Ca	Mg	Mn		Na	K	Ca	Mg	Mn	
RR <sub>1</sub>	0,61	0,22	2,85	1,61	0,16		0,46	0,21	4,33	2,99	0,19		0,37	0,39	4,75	3,74	0,21	
RR <sub>2</sub>	0,72	0,26	2,63	1,52	0,25		0,27	0,21	1,98	1,99	0,25		0,35	0,32	2,00	3,49	0,31	
D <sub>1</sub>	0,77	0,22	2,28	1,48	0,20		0,39	0,26	4,16	3,32	0,18		0,45	0,22	1,73	3,26	0,20	
D <sub>2</sub>	0,91	0,23	3,05	1,42	0,37		0,37	0,21	2,78	1,74	0,33		0,34	0,27	3,09	2,19	0,65	
SD <sub>1</sub>	0,43	0,41	1,94	3,27	0,19		0,47	0,73	3,92	3,47	0,26		0,20	0,38	2,25	3,90	0,23	
SD <sub>2</sub>	0,47	0,87	3,21	3,07	0,32		0,39	0,97	4,42	2,74	0,39		0,28	0,68	3,28	3,73	0,39	
P <sub>1</sub>	0,29	0,39	2,75	3,23	0,24		0,36	0,72	3,83	3,83	0,30		0,37	0,40	2,28	3,98	0,27	
P <sub>2</sub>	0,37	0,26	3,62	3,74	0,27		0,40	0,48	4,72	3,14	0,29		0,35	0,29	2,41	3,90	0,36	
Ct <sub>1</sub>	0,54	0,47	3,23	1,57	0,59		0,37	0,78	3,69	2,24	0,42		0,37	1,61	3,75	2,56	1,09	
Ct <sub>2</sub>	0,57	0,45	3,18	1,46	0,28		0,27	0,70	2,80	1,36	0,31		0,29	1,50	3,12	3,23	1,05	
CH <sub>1</sub>	0,45	0,31	3,45	1,42	0,52		0,28	0,41	4,38	1,78	0,47		0,47	0,99	4,81	2,88	1,63	
CH <sub>2</sub>	0,78	0,30	3,05	1,47	0,43		0,45	0,35	3,88	1,90	0,40		0,23	0,44	3,33	1,94	1,42	
Cd <sub>1</sub>	0,89	0,49	3,13	1,66	0,52		0,28	0,63	3,33	2,86	0,32		0,43	1,12	4,63	3,11	0,82	
Cd <sub>2</sub>	0,80	1,35	3,85	1,92	0,35		0,71	0,47	2,06	2,78	0,37		0,33	0,68	3,73	3,31	0,83	
LR <sub>1</sub>	0,90	0,28	2,95	1,55	0,22		0,47	0,47	2,70	3,98	0,25		0,31	0,85	3,63	3,62	0,71	
LR <sub>2</sub>	0,84	0,46	3,50	1,57	0,31		0,39	0,26	2,39	2,16	0,19		0,49	0,40	3,44	2,82	0,44	



Cuadro 5. Determinación de cationes cambiables por el método modificado de Díaz-Romeu - Balerdi en ocho suelos superficiales y subsuperficiales.

Mues- tra	SECO meq/100 g						HUMEDO meq/100 g						SIN MATERIA ORGANICA meq/100 g											
	Na		K		Ca		Mg		Na		K		Ca		Mg		Na		K		Ca		Mg	
RR <sub>1</sub>	0,31	0,30	1,75	0,35	0,26	0,20	1,30	0,34	0,66	0,68	0,58	0,35	0,31	0,30	1,75	0,35	0,26	0,20	1,30	0,34	0,66	0,68	0,58	0,35
RR <sub>2</sub>	0,31	0,65	3,95	0,90	0,26	0,34	5,35	1,90	0,60	0,34	1,03	0,71	0,31	0,65	3,95	0,90	0,26	0,34	5,35	1,90	0,60	0,34	1,03	0,71
D <sub>1</sub>	0,30	0,40	1,85	1,25	0,38	0,31	1,70	1,16	0,90	0,34	1,74	2,14	0,30	0,40	1,85	1,25	0,38	0,31	1,70	1,16	0,90	0,34	1,74	2,14
D <sub>2</sub>	0,29	0,65	3,55	1,35	0,30	0,23	6,05	0,84	0,75	0,41	0,50	1,72	0,29	0,65	3,55	1,35	0,30	0,23	6,05	0,84	0,75	0,41	0,50	1,72
SD <sub>1</sub>	0,66	0,79	1,85	1,22	0,64	0,68	2,23	0,99	0,63	0,86	1,82	1,25	0,66	0,79	1,85	1,22	0,64	0,68	2,23	0,99	0,63	0,86	1,82	1,25
SD <sub>2</sub>	0,39	2,91	4,97	2,33	0,58	2,25	4,63	2,23	0,75	2,98	3,85	2,46	0,39	2,91	4,97	2,33	0,58	2,25	4,63	2,23	0,75	2,98	3,85	2,46
P <sub>1</sub>	0,54	0,60	1,82	1,21	0,58	0,65	1,83	0,97	0,77	0,87	2,10	1,11	0,54	0,60	1,82	1,21	0,58	0,65	1,83	0,97	0,77	0,87	2,10	1,11
P <sub>2</sub>	0,43	0,28	7,94	1,36	0,48	0,25	5,94	1,10	0,56	0,33	5,60	1,16	0,43	0,28	7,94	1,36	0,48	0,25	5,94	1,10	0,56	0,33	5,60	1,16
Ct <sub>1</sub>	0,30	3,10	9,90	3,36	0,31	2,53	10,65	2,91	0,84	2,80	3,85	3,33	0,30	3,10	9,90	3,36	0,31	2,53	10,65	2,91	0,84	2,80	3,85	3,33
Ct <sub>2</sub>	0,42	2,85	10,40	2,88	0,50	2,43	9,70	2,73	0,72	2,78	4,98	3,08	0,42	2,85	10,40	2,88	0,50	2,43	9,70	2,73	0,72	2,78	4,98	3,08
CH <sub>1</sub>	0,37	2,50	9,95	2,59	0,32	1,17	9,20	2,42	0,86	1,67	5,31	3,44	0,37	2,50	9,95	2,59	0,32	1,17	9,20	2,42	0,86	1,67	5,31	3,44
CH <sub>2</sub>	0,52	1,60	8,85	3,10	0,45	0,95	10,25	2,89	0,69	1,16	5,10	2,72	0,52	1,60	8,85	3,10	0,45	0,95	10,25	2,89	0,69	1,16	5,10	2,72
Cd <sub>1</sub>	0,34	2,60	10,20	4,91	0,45	1,92	9,25	4,13	0,81	2,75	4,33	8,55	0,34	2,60	10,20	4,91	0,45	1,92	9,25	4,13	0,81	2,75	4,33	8,55
Cd <sub>2</sub>	0,54	1,70	9,50	4,25	0,51	1,28	9,50	4,16	1,03	1,27	4,65	7,51	0,54	1,70	9,50	4,25	0,51	1,28	9,50	4,16	1,03	1,27	4,65	7,51
LR <sub>1</sub>	0,34	2,30	12,00	5,27	0,36	1,66	11,70	5,24	1,09	2,14	3,67	9,59	0,34	2,30	12,00	5,27	0,36	1,66	11,70	5,24	1,09	2,14	3,67	9,59
LR <sub>2</sub>	0,69	0,95	11,25	4,82	0,51	0,46	9,85	4,61	1,10	0,57	6,21	7,27	0,69	0,95	11,25	4,82	0,51	0,46	9,85	4,61	1,10	0,57	6,21	7,27

Cuadro 6. Suma y saturación de bases de los métodos de resina y modificado de Díaz-Romeu - Balerdi en los suelos estudiados.

M U E S T R A	RESINA																																																																																																																																																																																															
	DÍAZ-ROMEU - BALERDI						RESINA																																																																																																																																																																																									
	Seco			Húmedo			Sin Materia Orgánica			Seco			Húmedo			Sin Materia Orgánica																																																																																																																																																																																
	meq/100 g	Sat. bas. %	Sat. bas. %	meq/100 g	Sat. bas. %	Sat. bas. %	meq/100 g	Sat. bas. %	Sat. bas. %	meq/100 g	Sat. bas. %	Sat. bas. %	meq/100 g	Sat. bas. %	Sat. bas. %	meq/100 g	Sat. bas. %	Sat. bas. %																																																																																																																																																																														
RR <sub>1</sub>	5,45	33,94	8,18	35,55	9,46	47,14	2,71	87,99	2,10	19,83	2,20	42,88	5,38	21,20	4,70	16,13	6,47	11,97	5,81	16,73	7,85	23,57	2,68	14,07	4,95	30,44	8,31	36,01	5,86	25,93	3,80	43,23	3,55	28,17	5,12	36,78	5,98	21,77	5,43	21,44	6,54	12,46	5,84	13,93	7,42	30,55	3,38	11,83	6,24	37,20	8,85	39,25	6,96	30,18	4,52	41,13	4,54	30,99	4,56	62,21	7,94	31,30	8,91	27,13	8,36	28,00	10,60	28,94	9,69	28,75	10,04	32,63	6,90	26,56	9,04	26,64	7,30	22,65	4,17	27,10	4,03	21,15	4,85	73,49	8,26	30,97	9,02	29,55	7,31	16,85	10,01	29,70	7,77	27,92	7,65	32,64	6,40	17,99	7,50	23,76	9,38	19,95	16,66	28,29	16,40	47,32	10,32	21,10	5,94	22,12	5,44	22,74	9,19	17,81	16,55	28,89	15,36	43,91	11,56	21,32	6,15	23,59	7,32	28,32	10,78	27,73	15,41	30,76	13,11	34,13	11,28	23,33	6,03	27,52	6,98	30,87	7,36	18,99	14,07	28,08	14,54	30,20	9,67	17,84	6,69	26,92	7,42	27,36	10,11	25,71	18,05	35,41	15,75	39,09	16,44	38,69	8,27	35,91	6,39	27,19	8,88	21,30	15,99	33,49	15,45	41,25	14,46	31,95	5,90	24,80	7,87	32,89	9,12	21,87	19,91	33,81	18,89	41,86	16,49	33,60	6,68	30,00	5,39	27,81	7,59	22,77	17,71	32,50	15,43	35,20	15,15	24,17

Cuadro 7. Determinación de hierro y aluminio intercambiables por el método de resina en ocho suelos superficiales y sub-superficiales.

Muestra	SECO		HUMEDO		SIN MATERIA ORGANICA	
	Fe meq/100 g	Al meq/100 g	Fe meq/100 g	Al meq/100 g	Fe meq/100 g	Al meq/100 g
RR <sub>1</sub>	3,27	6,94	4,70	9,57	3,62	6,60
RR <sub>2</sub>	3,30	19,40	4,84	19,45	17,50	29,77
D <sub>1</sub>	3,19	7,77	4,71	9,63	6,75	9,63
D <sub>2</sub>	3,46	17,74	4,89	14,72	17,39	28,27
SD <sub>1</sub>	3,19	6,88	5,24	7,92	4,40	11,28
SD <sub>2</sub>	3,54	13,48	8,13	15,34	9,37	11,77
P <sub>1</sub>	3,67	15,07	4,97	19,45	4,73	19,80
P <sub>2</sub>	3,89	14,25	6,59	14,58	7,51	28,25
Ct <sub>1</sub>	4,53	24,14	6,24	17,33	14,96	22,22
Ct <sub>2</sub>	3,83	16,65	4,82	13,20	15,91	26,09
CH <sub>1</sub>	3,35	16,10	4,81	13,20	11,18	16,50
CH <sub>2</sub>	3,75	12,49	4,91	10,45	12,45	18,70
Cd <sub>1</sub>	4,56	13,04	5,54	14,58	12,20	16,50
Cd <sub>2</sub>	4,21	10,23	5,70	11,00	14,10	18,43
LR <sub>1</sub>	3,70	13,76	3,97	11,60	14,62	17,60
LR <sub>2</sub>	2,81	12,49	4,05	9,63	7,05	18,43

Cuadro 8. CIC de las fracciones orgánicas determinados por dos métodos químicos en ocho suelos y subsuelos.

Muestra	Acidos Fúlvicos		Acidos Húmicos	
	Ca(OAc) <sub>2</sub> meq/100 g	BaCl <sub>2</sub> -TEA meq/100 g	Ca(OAc) <sub>2</sub> meq/100 g	BaCl <sub>2</sub> -TEA meq/100 g
RR <sub>1</sub>	83,58	70,08	46,85	25,55
RR <sub>2</sub>	54,03	179,22	133,31	64,79
D <sub>1</sub>	53,28	57,67	75,06	28,29
D <sub>2</sub>	30,50	173,38	124,31	61,14
SD <sub>1</sub>	43,48	105,49	74,08	37,42
SD <sub>2</sub>	41,06	130,31	183,09	89,98
P <sub>1</sub>	50,27	110,10	134,03	60,23
P <sub>2</sub>	87,21	191,99	137,20	56,21
Ct <sub>1</sub>	55,65	177,76	120,68	63,88
Ct <sub>2</sub>	34,43	137,97	128,90	54,39
CH <sub>1</sub>	57,57	149,65	107,83	62,60
CH <sub>2</sub>	59,61	144,98	113,47	58,95
Cd <sub>1</sub>	70,45	144,18	111,65	56,03
Cd <sub>2</sub>	88,65	237,98	111,31	44,78
LR <sub>1</sub>	78,85	106,58	53,02	47,27
LR <sub>2</sub>	68,83	89,06	69,32	43,07

Cuadro 9. Coeficientes lineales de las características químicas estudiadas en los ocho suelos superficiales y subsuperficiales.

$\hat{y}$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$	$b_8$	$b_9$	F Mult.	$R^2$
NaOAc	-1,48244	4,174709	0,044844	0,004977	-3,852276	3,806526	-1,827637	0,221318	0,141887		7,14	0,712
NH <sub>4</sub> OAc	-4,56080	1,853188	0,107614	0,138457	-3,762469	1,903078	2,282146	0,154710	0,064588		6,36	0,688
Ca(OAc) <sub>2</sub>	18,67071	1,442676	0,619326	-0,507873	0,619723	1,168984	3,822094	0,041935	-0,442355		12,38	0,811
Mg(OAc) <sub>2</sub>	8,60364	1,371670	0,530265	-0,123602	-2,112377	0,821222	2,996622	0,115373	-0,351296		15,15	0,840
BaCl <sub>2</sub> -TEA	-8,19206	2,505599	0,448591	-0,054700	-1,983333	1,512025	-1,083247	0,143213	0,004464		12,84	0,817
AF	15,04439	-0,474310	8,621437	0,356513	-2,095338	-0,167085	-0,065482	11,825990	-1,776651		37,28	0,928
AH	43,36654	-0,287194	-1,700276	-0,123958	-0,187266	0,077798	-0,096375	-1,644815	-2,551486		11,99	0,806
Fe	0,69011	0,073862	0,025558	-0,025025	0,023014	-0,016471	0,008702	-0,002303			6,51	0,655
Al	0,34630	-0,162127	0,004628	0,011536	0,161220	1,591689	0,027526	-0,019979			9,94	0,743
Si	-0,10167	0,195672	-0,002301	-0,002983	-0,156601	0,221735	0,005558	0,013302			22,67	0,868
Altof.	-8,81897	0,405130	-0,893526	1,437346	11,396198	3,076838	1,049617	-0,040502	11,784301	-2,974964	9,66	0,798



Cuadro 11. Regresiones múltiples de los cinco métodos usados de la CIC en los suelos estudiados.

Características	NaOAc		NH <sub>4</sub> OAc		Ca(OAc) <sub>2</sub>		Mg(OAc) <sub>2</sub>		BaCl <sub>2</sub> -TEA	
	Coefficiente	t	Coefficiente	t	Coefficiente	t	Coefficiente	t	Coefficiente	t
MO	4,174709	1,992	1,853188	1,134	1,442676	0,933	1,371670	1,153	2,505599	3,862**
AF	0,044844	0,192	0,107614	0,590	0,619326	3,596**	0,530265	5,320**	0,448591	6,204**
AH	0,004977	0,006	0,138457	0,243	-0,507873	-0,943	-0,123602	-0,396	-0,054700	-0,241
Fe	-3,852276	-0,675	-3,762469	-0,845	0,619723	0,147	-2,112377	-0,867	-1,983333	-1,122
Al	3,806526	1,765	1,903078	1,132	1,168994	0,735	0,821222	0,892	1,512025	2,265
Si	-1,827637	-0,316	2,282146	0,506	3,822094	0,897	2,996622	1,215	-1,083247	-0,605
Alóf	0,221318	1,148	0,154710	1,029	0,041935	0,295	0,115373	1,403	0,143213	2,401*
MA	0,141887	0,799	0,064588	0,466	-0,442355	-3,382**	-0,351296	-4,640**	0,004464	0,081
Confianza (R <sup>2</sup> )	0,712		0,688		0,811		0,840		0,817	
F Múltiple	7,14		6,36		12,38		15,15		12,84	

\* Significativa 5%

\*\* Altamente significativa 1%

Cuadro 12. Regresiones múltiples de las características químicas estudiadas en los ocho suelos superficiales y subsuperficiales.

Características	Ácidos fúlvicos		Ácidos húmicos		Fe libre		Al libre		Si libre		Alofán	
	Coefficiente	t	Coefficiente	t	Coefficiente	t	Coefficiente	t	Coefficiente	t	Coefficiente	t
MO	---	---	---	---	0,073862	1,005	-0,162127	-0,828	0,195672	3,138**	0,405130	0,189
AF	---	---	-0,287194	-0,576	0,025558	3,917**	0,004628	0,209	-0,002301	-0,279	-0,893526	-2,023
AH	-0,474310	-0,516	---	---	-0,025025	-0,976	0,011536	0,166	-0,002983	-0,115	1,437346	1,728
Fe	8,621437	4,255**	-1,700276	-1,546	---	---	0,161220	0,298	-0,156601	-0,786	11,396198	1,898
Al	0,356513	0,372	-0,123958	-0,238	-0,023014	0,998	---	---	0,221735	3,618**	3,076838	1,456
Si	-2,095338	-0,657	-3,187266	-1,841	-0,160471	-0,786	1,591689	3,618**	---	---	1,049617	0,138
Alóf.	-0,167085	-2,098	0,077798	1,800	0,008702	1,306	0,027526	1,586	0,005558	0,828	---	---
MA	-0,065482	-0,502	-0,096375	-1,363	-0,002303	-0,363	-0,019979	-1,226	0,013302	2,354*	-0,040502	-0,129
Dap	11,825990	8,321**	-1,644815	-2,132	---	---	---	---	---	---	11,784301	1,866
Alt	-1,776751	-1,064	-2,551486	-2,817*	---	---	---	---	---	---	-2,974964	-0,675
Confianza (R <sup>2</sup> )	0,928		0,806		0,655		0,743		0,868		0,798	
F Múltiple	37,28		11,99		6,51		9,94		28,67		9,66	

\* Significativa 5%

\*\* Altamente significativa 1%



Cuadro 13. Prueba de Duncan de los métodos usados en la CIC de los suelos estudiados ( $P < 0,01$ ).

Métodos	SECO		HUMEDO		SIN MATERIA ORGANICA	
	Medias	Significación*	Medias	Significación*	Medias	Significación
Patrón	24,0243	c	26,1443	b c	38,1268	b c
NaOAc	33,3153	a b	43,9834	a	46,1812	a
NH <sub>4</sub> OAc	38,3531	a	30,7381	b	33,8790	b c d
Ca(OAc) <sub>2</sub>	31,0259	a b c	13,4171		6,9895	
Mg(OAc) <sub>2</sub>	21,9006		14,6743		24,5074	e
BaCl <sub>2</sub> -TEA	19,6037		16,1718		40,6909	a b <sup>~</sup>

\* Las medias de los métodos con letras iguales no son significativamente diferentes ( $P < 0,01$ )

Cuadro 14. Composición mineralógica de la fracción arena (50 $\mu$  - 500 $\mu$ ) de algunas muestras en los suelos estudiados.

Muestras	----- MINERALES PESADOS -----			----- MINERALES LIVIANOS -----			
	Minerales* livianos	Augita	Hiperstena	Hormolenda	Vidrio	Feldespato	Fitolito
RR <sub>2</sub>	X	X	X	-	X	X	-
P <sub>1</sub>	-	X	X	-	X	X	-
P <sub>2</sub>	-	X	X	-	X	X	-
Cd <sub>2</sub>	-	X	X	-	X	X	-
LR <sub>2</sub>	-	X	X	X	X	X	X

\* Pueden encontrarse rodeando a granos de minerales pesados.

X = Presente

- = Ausente

Cuadro 15. Humedad perdida al secar los suelos estudiados a 105°C-110°C.

Muestras	Seco %	Húmedo %	Sin materia orgánica %
RR <sub>1</sub>	0,40	11,30	0,40
RR <sub>2</sub>	1,81	7,55	1,81
D <sub>1</sub>	1,22	12,40	1,22
D <sub>2</sub>	1,23	9,72	1,23
SD <sub>1</sub>	1,56	11,24	1,56
SD <sub>2</sub>	1,16	9,95	1,16
P <sub>1</sub>	1,77	10,50	1,77
P <sub>2</sub>	1,95	9,76	1,95
Ct <sub>1</sub>	2,06	17,50	2,06
Ct <sub>2</sub>	2,49	16,52	2,49
CH <sub>1</sub>	2,21	13,54	2,21
CH <sub>2</sub>	2,68	11,51	2,68
Cd <sub>1</sub>	2,07	12,87	2,07
Cd <sub>2</sub>	2,81	14,20	2,81
LR <sub>1</sub>	1,05	7,75	1,05
LR <sub>2</sub>	2,31	13,60	2,31

Cuadro 16. Correlaciones de la CIC entre los métodos usados en los suelos estudiados.

Métodos	Muestras Totales		Muestras Superficiales		Muestras Subsuperficiales		
	Seco	Húmedo	Sin MO	Húmedo	Sin MO	Húmedo	Sin MO
NaOAc vs NH <sub>4</sub> OH	0,89**	0,96**	0,93**	0,76**	0,83**	0,93**	0,87**
NaOAc vs Ca(OAc) <sub>2</sub>	0,11	-0,49*	-0,50*	0,56*	0,87**	-0,23	-0,56*
NaOAc vs Mg(OAc) <sub>2</sub>	-0,26	-0,31	0,01	0,52*	0,82**	-0,73**	-0,43
NaOAc vs BaCl <sub>2</sub> -TEA	0,05	0,41	0,80**	0,92**	0,89**	0,48	0,52*
NH <sub>4</sub> OAc vs Ca(OAc) <sub>2</sub>	0,37	-0,52*	-0,50*	0,93**	0,84**	0,60*	-0,57*
NH <sub>4</sub> OAc vs Mg(OAc) <sub>2</sub>	-0,09	-0,33	0,08	0,87**	0,93**	-0,43	-0,38
NH <sub>4</sub> OAc vs BaCl <sub>2</sub> -TEA	0,07	0,37	0,83**	0,94**	0,98**	0,50*	0,50
Ca(OAc) <sub>2</sub> vs Mg(OAc) <sub>2</sub>	0,64**	0,93**	0,66**	0,86**	0,71**	0,64**	0,89**
Ca(OAc) <sub>2</sub> vs BaCl <sub>2</sub> -TEA	0,30	0,36	-0,34	0,79**	0,95**	-0,02	-0,40
Mg(OAc) <sub>2</sub> vs BaCl <sub>2</sub> -TEA	0,62**	0,53*	0,30	0,73**	0,96**	0,21	-0,08

\* Significativa 5%

\*\* Altamente significativa 1%

Cuadro 17. Regresiones múltiples para los métodos<sup>1</sup> de la CIC en muestras en seco, húmedo y sin materia orgánica de los suelos estudiados.

Características	SECO Ca(OAc) <sub>2</sub>		HUMEDA NH <sub>4</sub> OAc		SIN MATERIA ORGANICA NH <sub>4</sub> OAc		BaCl <sub>2</sub> -TEA	
	Coefficiente	t	Coefficiente	t	Coefficiente	t	Coefficiente	t
MO	0,717	0,641	3,438	1,989	--	--	--	--
AF	0,867	2,110*	-0,947	-2,121*	--	--	--	--
AH	-0,426	-1,072	-0,037	-0,060	--	--	--	--
Fe	-30,422	-2,434*	0,601	0,031	-10,620	-0,525	6,281	4,627**
Al	2,903	2,845**	4,043	1,846	3,046	2,560*	5,406	5,848**
Si	8,824	2,271*	-4,840	-0,805	-0,676	-0,107	1,734	0,492
Al <sub>of</sub>	0,241	2,117*	-0,076	-0,434	0,139	0,753	0,024	0,232
MA	-0,667	-3,927**	-0,465	2,130*	-0,593	-2,157*	0,065	-3,984**
R <sup>2</sup>	0,881		0,699		0,651		0,922	
F Múltiple	21,42		6,69		5,37		34,16	

\* Significativa  
 \*\* Altamente significativa  
<sup>1</sup> Métodos no significativamente diferentes con el patrón (método de la resina) en la prueba de Duncan.

Cuadro 18. Densidad de la materia orgánica de los suelos estudiados.

Muestra	Materia orgánica %	Densidad de partículas		Densidad de la materia orgánica (g/ml)
		c/MO (g/ml)	s/MO (g/ml)	
RR <sub>1</sub>	0,34	2,70	2,74	0,51
RR <sub>2</sub>	4,53	2,49	2,62	1,22
D <sub>1</sub>	1,40	2,63	2,73	0,73
D <sub>2</sub>	6,20	2,43	2,58	1,29
SD <sub>1</sub>	2,11	2,69	2,72	1,78
SD <sub>2</sub>	5,17	2,57	2,65	1,65
P <sub>1</sub>	3,25	2,64	2,73	1,33
P <sub>2</sub>	0,80	2,62	2,71	0,51
Ct <sub>1</sub>	7,24	2,35	2,39	1,93
Ct <sub>2</sub>	3,39	2,45	2,47	1,99
CH <sub>1</sub>	4,62	2,53	2,55	2,17
CH <sub>2</sub>	2,62	2,56	2,59	1,79
Cd <sub>1</sub>	4,83	2,47	2,58	1,04
Cd <sub>2</sub>	1,18	2,56	2,60	1,12
LR <sub>1</sub>	9,35	2,21	2,40	1,25
LR <sub>2</sub>	2,61	2,47	2,53	1,31

Deducción de la fórmula de la densidad de la materia orgánica\*:

Teniéndose que:

$$V_{cmo} = V_{smo} \frac{(100 - c)}{100} + V_{mo} \left( \frac{c}{100} \right)$$

$$100 V_{cmo} = V_{smo} (100 - c) + c V_{mo}$$

$$100 V_{cmo} - V_{smo} (100 - c) = c V_{mo}$$

\* Comunicación personal de Forsythe.

$$\frac{100 V_{\text{cmo}} - V_{\text{sno}} (100 - c)}{c} = V_{\text{mo}}$$

$$V_{\text{mo}} = \frac{100 V_{\text{cmo}} - (100 - c) V_{\text{sno}}}{c} \quad (1)$$

Sabiéndose que:  $V_{\text{mo}} = \frac{1}{e_{\text{mo}}}$

$$V_{\text{cmo}} = \frac{1}{e_{\text{cmo}}} \quad V_{\text{sno}} = \frac{1}{e_{\text{sno}}}$$

Sustituyéndose en la fórmula (1) se tiene:

$$\frac{1}{e_{\text{mo}}} = \frac{100 (1/e_{\text{cmo}}) - (100 - c) 1/e_{\text{sno}}}{c}$$

$$\frac{c}{e_{\text{mo}}} = \frac{100}{e_{\text{cmo}}} - \frac{(100 - c)}{e_{\text{sno}}} \quad (2)$$

Buscando como factor común  $e_{\text{mo}}$  en la fórmula (2) se tiene que:

$$c e_{\text{cmo}} e_{\text{sno}} = 100 e_{\text{mo}} e_{\text{sno}} - e_{\text{mo}} e_{\text{cmo}} (100 - c)$$

$$c e_{\text{cmo}} e_{\text{sno}} = e_{\text{mo}} [100 e_{\text{sno}} - (100 - c) e_{\text{cmo}}]$$

Encontrándose que la densidad de la materia orgánica ( $e_{\text{mo}}$ ) es igual a:

$$e_{\text{mo}} = \frac{c e_{\text{cmo}} e_{\text{sno}}}{100 e_{\text{sno}} - (100 - c) e_{\text{cmo}}}$$

Donde:

$V_{\text{cmo}}$  = Volumen por unidad masa con materia orgánica.

$V_{\text{sno}}$  = Volumen por unidad masa sin materia orgánica.

$V_{\text{mo}}$  = Volumen por unidad masa de materia orgánica.

$c$  = % de materia orgánica de la muestra con materia orgánica.

$e_{\text{cmo}}$  = Densidad de partículas con materia orgánica.

$e_{\text{sno}}$  = Densidad de partículas sin materia orgánica.

Fe de errata: Página 43 - línea 8

debe leerse:

$$Y_i = b_0 + b_1x_{1i} + b_2x_{2i} + b_3x_{3i} + b_4x_{4i} + b_5x_{5i} + b_6x_{6i}$$

y línea 10

debe leerse:

$b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$  = Coeficientes lineales de regresión