03091

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

4

UNIDAD ACADEMICA DE LOS CICLOS PROFESIONALES
Y DE POSGRADO

INSTITUTO DE GEOLOGIA

MODELO PEDOGENETICO PARA ESTABLECER LA EDAD EVOLUTIVA DE ANDISOLES

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE

DOCTORA EN CIENCIAS (GEOLOGIA)

P R E S E N T A

ELIZABETH SOLLEIRO REBOLLEDO

MEXICO, D. F. 1997

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Nuestro Teniente General, L. Euler, produce, gracias a nuestros buenos oficios, la siguiente Declaración. Confiesa abiertamente:

...

III. que, a pesar de ser el rey de las matemáticas, se sonrojará eternamente por su ofensa al sentido común y la sabiduría más popular cometida al deducir de sus fórmulas que un cuerpo atraído por fuerzas gravitacionales situado en el centro de la esfera cambiará bruscamente su dirección en el centro.

IV. que hará todo lo que pueda para no permitir que la razón sea traicionada otra vez por una fórmula errónea. Pide perdón de rodillas por haber postulado a la vista de un resultado paradójico: "aunque parezcan contradecir la realidad debemos confiar más en nuestros cálculos que en nuestro buen sentido"

V. que en el futuro nunca más llevará a cabo cálculos de sesenta páginas para obtener un resultado que puede deducirse en diez líneas después de algunas reflexiones cuidadosas; y si alguna vez vuelve a remangarse para hacer cálculos durante tres días y tres noches consecutivas, invertirá un cuarto de hora para pensar qué principios (de cálculo) serán los más apropiados.

Tomado de <<La Diatriba del Doctor Akakia>>, de Voltaire

(Noviembre de 1752)

ÍNDICE

PRÓLOGO i

AGRADECIMIENTOS iii

RESUMEN iv

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

I. INTRODUCCIÓN

1.1 La edad del suelo 1
1.2 Modelos que determinan la etapa de desarrollo de un suelo 2
1.3 Definición de Andisoles 3
1.4 Los Andisoles en el mundo y en México 5
1.5 Objetivo 6
1.6 Justificación 7
1.7 Hipótesis 7

II. METODOLOGÍAS Y MODELOS SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LOS SUELOS

2.1 Métodos para medir la edad de los suelos 8
2.1.1 Métodos concernientes a la etapa relativa de desarrollo 8
2.1.2. Métodos relacionados con el complejo de alteración e intemperismo 10
2.1.3 Fechamiento directo de horizontes y perfiles. 11
2.1.4 Métodos experimentales 13
2.1.5 Métodos indirectos 13
2.2 Los modelos como una herramienta para estimar la evolución de los suelos 14

III. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1 Propiedades diagnósticas de los Andisoles. 20
3.1.1. Morfología 20
3.1.2. Características físicas. 22
3.1.3. Características químicas. 22
3.1.4. Mineralogía 24

3.2 Índices empleados para evaluar a los factores formadores de suelo 25
3.2.1 Relacionados al clima 26
3.2.2 Relacionados con la vegetación 27
3.2.3 Relacionados con el material parental y el suelo. 27
3.2.4 Relacionados con el relieve 29
3.3 Métodos empleados para el muestreo y análisis de laboratorio de cada perfil. 29
3.3.1 Muestreo de suelos 29
3.3.2 Análisis de laboratorio 29
3.3.3. Análisis de los factores formadores 30
3.4 El modelo 31
3.4.1 Procedimiento para la obtención del modelo 32

IV. PERFILES Y FACTORES FORMADORES

4.1 Introducción 34
4.2 Los perfiles empleados en el modelo 35
4.2.1 Los perfiles 37
4.2.2 Secuencia evolutiva de los suelos analizados 46
4.2.3 Descripción de las propiedades usadas en el modelo 47
4.3 Factores formadores 49
4.3.1 Clima 51
4.3.2 Organismos 52
4.3.3 Relieve 54
4.3.4 Material parental 54

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

V. EL MODELO

5.1 Cambio de las propiedades e índices a lo largo del perfil 57
5.1 Propiedades morfoedáficas 57
5.2 Propiedades físicas 58
5.3 Propiedades químicas 61
5.4 Índices de intemperismo 63
5.2 Selección de propiedades e índices 66
5.2.1 Correlación entre las propiedades morfoedáficas y las propiedades físicas 67
5.2.2 Correlación entre las propiedades químicas 68
5.2.3 Correlación entre los índices de intemperismo 71
5.3 Secuencia de evolución teórica de los perfiles analizados y su relación con las propiedades e índices 72

5.4 Relación entre propiedades de los suelos y factores formadores. 74
5.4.1 Relación con los factores material parental y clima 74
5.4.2 Relación con el factor tiempo (edad de los depósitos) 75
5.5 El modelo 75
5.5.1 Propiedades que representan a las variables en el modelo 76
5.5.2 Regresión lineal múltiple de las variables seleccionadas 76
5.6 Factores formadores y las etapas de desarrollo 87
5.6.1. Índices universales 87
5.6.2. Indices que dependen de la vegetación 88
5.6.3. Indices que dependen del clima 88
5.6.4. Indices que dependen del relieve 89
5.6.5. Indices que dependen del material parental 89
5.7 Tendencias evolutivas de los perfiles 90

VI. CONSIDERACIONES Y CONCLUSIONES 97

VII. BIBLIOGRAFÍA 101

ANEXOS

Anexo I. Descripciones de los perfiles
Valores del índice de desarrollo relativo (DRP)
Valores de los análisis químicos de óxidos totales de los perfiles
Índices de alteración de los perfiles
Resultados de los balances geoquímicos de los perfiles
Cálculo de los elementos climáticos de las localidades

Anexo II. Figuras de las tendencias de cambio de las propiedades físicas

Anexo III. Figuras de las tendencias de cambio de las propiedades químicas

Anexo IV. Figuras de las tendencias de cambio de los índices de alteración

Anexo V. Figuras de las tendencias de cambio de los balances geoquímicos

Anexo VI. Tablas de los valores ponderados de las propiedades e índices

Anexo VII. Síntesis

ÍNDICE DE TABLAS

2.1 Valores de pK (velocidad de disolución) de diferentes minerales (Karathanasis, 1989) 17
2.2 Orden de dependencia sobre a_{H+} de la tasa de disolución sobre varios minerales (silicatos y óxidos) en soluciones ácidas reportadas en la literatura (Wollast y Chu, 1988) 18
3.1 Valores paramétricos asignados al porcentaje de cubrimiento y tipo de vegetación (FAO, 1989) 27
4.1 Localización de los 15 perfiles 36
4.2 Vegetación y material parental de los perfiles analizados 39
4.3 Condiciones climáticas y edafoclima de los perfiles analizados 39
4.4 Clasificación de los perfiles 40
4.5 Matriz de correlación (Philips, 1993a) 50
4.6 Valores de los índices relacionados con el clima 53
4.7 Valores de los índices relacionados con la vegetación 53
4.8 Valores de los índices relacionados con el relieve 56
4.9 Valores de los índices relacionados con el material parental 56
5.1 Valores del coeficiente de correlación R^2 para las propiedades físicas y morfoedáficas 69
5.2 Matriz de correlación que muestra el grado de dependencia entre las variables consideradas (prop. físicas) 69
5.3 Valores del coeficiente de correlación R^2 para las propiedades químicas 70
5.4 Matriz de correlación que muestra el grado de dependencia entre las variables consideradas (prop. químicas) 70
5.5 Valores del coeficiente de correlación R^2 para los índices de alteración 71
5.6 Matriz de correlación que muestra el grado de dependencia entre las variables consideradas (índices de alteración) 72
5.7 Coeficientes de correlación lineal entre las propiedades seleccionadas (valores ponderados) y el oreden establecido predeterminado de desarrollo de los perfiles 73
5.8 Valores considerados para la regresión múltiple entre DRP y el resto de las variables 77
5.9 Resultado de la regresión tomando Y=DRP, considerando Pret 77
5.10 Resultado de la regresión tomando Y=DRP, sin considerr Pret 78
5.11 Valores calculados con las ecuaciones obtenidas y diferencias entre los valores de DRP observado y teórico 79
5.12 Intervalos de valores de las diferencias entre los valores de DRP teóricos y observados y porcentaje de valores que cayó en cada intervalo 79
5.13 Valores de la media, desviación estándar y R^2 para las ecuaciones obtenidas 80

5.14 Valores considerados para la regresión múltiple entre limo más arcilla y el resto de las variables 81
5.15 Resultado de la regresión tomando Y=limo más arcilla, considerando todas las variables 81
5.16 Resultado de la regresión tomando Y=limo más arcilla, sin considerar Pret 81
5.17 Resultado de la regresión tomando Y=limo más arcilla, sin considerar DRP 82
5.18 Resultado de la regresión tomando Y=limo más arcilla, sin considerar Pret y DRP 82
5.19 Valores de limo más arcilla calculados con las ecuaciones obtenidas y diferencias entre los valores observados y teóricos 83
5.20 Intervalos de valores de las diferencias entre los valores de limo más arcilla teóricos y observados y porcentaje de valores que cayó en cada intervalo 84
5.21 Valores de la media, desviación estándar y R^2 para las ecuaciones obtenidas 84
5.22 Valores de limo más arcilla ordenados de manera ascendente 86
5.23 Intervalo de valores de limo más arcilla calculados, correspondientes a cada etapa evolutiva 86
5.24 Valores de los índices relacionados con los factores formadores 94
5.25 Valores paramétricos de los índices relacionados con los factores formadores 95
5.26 Resumen del desarrollo que muestra cada perfil y la velocidad de pedogénesis 96

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1 Distribución de los Andosoles en el mundo (FAO-ISSS-ISRIC, 1994)
1.2 Distribución en México de suelos derivados de cenizas y materiales volcánicos
3.1 Representación esquemática de algunos perfiles de Andisoles (Shoji et al., 1993a).
4.1 Distribución de los perfiles empleados en el modelo
5.1 Relación entre DRP y la secuencia evolutiva
5.2 Relación entre limo más arcilla y la secuencia evolutiva
5.3 Relación entre retención de humedad y la secuencia evolutiva
5.4 Relación entre retención de fosfatos y la secuencia evolutiva
5.5 Relación entre capacidad de intercambio catiónico

y la secuencia evolutiva
5.6 Relación entre sílice/aluminio y la secuencia evolutiva
5.7 DRP y limo más arcilla en suelos derivados de materiales ácidos y andesíticos
5.8 Sa y CIC en suelos derivados de materiales ácidos y andesíticos
5.9 H_2O y Pret en suelos derivados de materiales ácidos y andesíticos
5.10 Relación entre DRP y limo más arcilla y la edad de los depósitos
5.11 Diferencia entre DRP observado y teórico obtenido con las ecuaciones de regresión
5.12 Relación entre DRP observado y teórico obtenido con las ecuaciones de regresión
5.13 Diferencia entre limo más arcilla observada y teórica obtenida con las ecuaciones de regresión
5.14 Relación entre limo más arcilla observada y teórica obtenida con las ecuaciones de regresión
5.15 Valores paramétricos que caracterizan a los factores formadores y que indican la etapa de desarrollo potencial del suelo

PRÓLOGO

"Se cuenta que un astrónomo, un físico y un matemático estaban de vacaciones en Escocia. Al echar una ojeada por la ventanilla del tren, vieron una oveja negra en medio del campo. "¡Qué interesante!", observó el astrónomo, "todas las ovejas escocesas son negras". A lo que respondió el físico, "¡No, no! ¡Algunas ovejas escocesas son negras!". El matemático alzó suplicante la mirada al cielo y entonó, "En Escocia existe al menos un campo, que contiene al menos una oveja, uno de cuyos lados, al menos, es negro". Los matemáticos (cuando están en forma) tienden a la prudencia". (Steward, I984).

Me pareció interesante comenzar este trabajo con la reflexión anterior, en virtud de que aquí se trata de utilizar a las matemáticas como una herramienta para la investigación edafológica, tal que es obligado recurrir a la prudencia, en la medida de lo posible, ya que en múltiples ocasiones, lo obvio ha resultado ser erróneo. Sin embargo, para llegar a la verdad es permisible decir "No me dejo engañar, aunque por el momento siga el engaño, y vea adónde conduce" (Steward op cit.) Durante el primer recorrido en el análisis de los fenómenos físicos, está permitido ignorar las dificultades, para contar con un plan de ataque básico y, si las cosas marchan bien, ir puliendo los detalles. Así, las propuestas pueden ir sentándose sobre bases sólidas.

Es así que, aunque el modelo que se propone en esta ocasión, quizá no se ajusta al cien por ciento con la realidad, es una primera aproximación, una primera propuesta que debe ir puliéndose. Sin embargo, su utilidad no debe soslayarse, ya que se trata de un intento serio y basado en un conocimiento profundo del suelo como un sistema, así como de su génesis.

Además, se ha optado por la sencillez en el modelo, aunque no refleje del todo el comportamiento de cada una de las partes del sistema, pero sí indica las tendencias evolutivas que siguen todas como un conjunto; que en la matemática moderna es más útil que el estudio de las partes, ya que de esta manera es posible hacer generalizaciones.

Es importante resaltar, que un modelo que marque el comportamiento del suelo, dentro del ambiente en el que se ha desarrollado, es muy importante, ya que permite establecer hasta qué punto el hombre ha ejercido una influencia negativa en él. Al respecto, se sabe que el hombre es unO de los mayores factores de cambio del suelo (Arnold et al., 1992), porque incide en todos los medios que interactúan con la pedósfera (hidrósfera, biósfera, litósfera, atmósfera) con un resultado casi inmediato.

Así, es necesario analizar profundamente el medio natural suelo para comprender el impacto antropogénico y, en la medida de lo posible, adaptar o mitigar los cambios naturales y humanos dentro del sistema biósfera-geósfera-sociedad. (Arnold op cit.). Con el modelo que aquí se propone, se está contribuyendo precisamente con información adecuada para medir los efectos que producen los factores naturales y contar con datos que permiten evaluar los efectos antrópicos, tal que puedan diseñarse medidas de control para el efecto degradatorio que el hombre pueda causar al edafoecosistema.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi agradecimiento a las autoridades del Instituto de Geología de la UNAM; al director Dr. Dante Jaime Morán Zenteno; al Ing. Rodolfo del Arenal, secretario académico y al subcomité de becas, por todo el apoyo brindado durante el tiempo que llevé a cabo la presente investigación, proporcionando todos los medios disponibles en el cumplimiento de los objetivos planteados.

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la UNAM, por la beca proporcionada para la realización de los estudios de doctorado. Asimismo al Programa de Apoyo a las Divisiones de Estudios de Posgrado por el apoyo económico brindado para la realización de trabajo de campo y edición de la tesis.

En especial quiero expresar mi agradecimiento al Dr. Víctor Manuel Malpica Cruz, director de esta tesis, por su ayuda constante y desinteresada. Con mucho cariño y respeto al Dr. Jorge Enrique Gama Castro, quien trabajó enormemente para darle forma y finalizar este proyecto.

A los miembros del H. Jurado: Dra. Norma Eugenia García Calderón, Dra. Klaudia Oleschko, Dr. David Flores Román, Dr. Luis Miguel Mitre y Dr. Gerardo Carrasco Núñez por su valiosa colaboración en la revisión y depuración del texto.

Agradezco al finado Profr. emérito Nicolás Aguilera Herrera, por su contribución a mi desarrollo profesional.

Con especial cariño al Mat. Angel Reyes García, por toda su ayuda no sólo en el plano personal, sino en el trabajo de cómputo para el procesamiento de datos, elaboración de gráficas y la edición del texto final.

Al Fís. Gerardo Zenteno por su desinteresada ayuda en el procesamiento e interpretación de datos para la obtención del modelo que se presenta en esta investigación. Al M. en C. Sergio Palacios Mayorga, jefe del Departamento de Edafología, por sus valiosos comentarios y apoyo brindados.

Asimismo, agradezco a la M. en C. Silvia Sánchez Beltrán, al M. en C. Miguel Ángel Valera y al Dr. Jorge Enrique Gama Castro por su contribución con los datos de los perfiles por ellos estudiados, y que permitieron el desarrollo del modelo.

Finalmente, a todas las personas que, de alguna manera, estuvieron involucradas de muy diversas maneras, en la consecución de las metas planteadas.

MODELO PEDOGENÉTICO PARA ESTABLECER LA EDAD EVOLUTIVA DE ANDISOLES

Solleiro Rebolledo Elizabeth

RESUMEN

Se presenta un modelo que indica la etapa de desarrollo de suelos derivados de materiales volcánicos, específicamente de cenizas volcánicas, y que conjugado con la información procedente de los factores formadores, permite establecer la historia genética del suelo, su comportamiento y tendencia evolutiva. El modelo diseñado es un modelo de regresón lineal múltiple, que a pesar de no reflejar completamente la realidad, es representativo del fenómeno que se investigó. Además posee la ventaja de ser sencillo y de fácil manejo, pues cuenta con un número pequeño de variables.

A pesar de que los suelos estudiados no mostraban un comportamiento completamente lineal, se eligió un modelo de este tipo, debido a que en las etapas iniciales e intermedias de desarrollo hasta llegar a la madurez, la tendencia de cambio que llevan las propiedades de estos suelos a lo largo del tiempo fueron prácticamente lineales.

Para la construcción del modelo se seleccionaron 14 perfiles de suelos derivados de materiales volcánicos, principalmente cenizas, de diferente composición y edad, pertenecientes a diversas condiciones climáticas (zona templada, subtropical y tropical). Además, cada uno de estos suelos representaba un estadío evolutivo diferente, desde los suelos menos evolucionados que aún se encontraban en el orden Entisol, hasta los más desarrollados, los cuales se clasificaron como Andisoles con diferente grado de desarrollo.

Por su parte, las variables que integraron el modelo se seleccionaron con base en las propiedades diagnósticas del orden Andisol, realizando una evaluación de su comportamiento a lo largo del perfil, ya que al ser un modelo lineal, se tomaron aquellas propiedades cuyo comportamiento fuera prácticamente lineal. Asimismo, se realizó un análisis de correlación entre las propiedades físicas, químicas e índices de intemperismo por separado y en parejas, con el fin de tomar sólo las que arrojaron los valores de correlación más pequeños.

Así, de las propiedades analizadas, las que mejor reflejaron el desarrollo de los suelos fueron: la relación sílice/aluminio, la capacidad de retención de humedad a 1500 kPa, la retención de fosfatos y la capacidad de intercambio catiónico, las cuales arrojaron valores del coeficiente de correlación mayores que 0.75, en relación con la secuencia evolutiva establecida para los suelos. Por su parte, el índice de desarrollo relativo (DRP) y la fracción acumulada limo más arcilla se tomaron como variables de respuesta y el resto de las propiedades como variables independientes. Ambos parámetros arrojaron valores de R^2 de 0.61 y 0.69, respectivamente. Sin embargo, fueron consideradas, a causa de que el DRP es un índice usado con frecuencia en investigaciones de suelos y paleosuelos; y la fracción limo más arcilla, porque al analizar su comportamiento en los suelos estudiados, se observó un incrementó en su proporción con la edad de los depósitos.

Se obtuvieron 7 ecuaciones de regresión, de las cuales se concluyó que la más representativa del comportamiento de los Andisoles fue aquella que consideró como variable de respuesta a la suma limo más arcilla.

De todas las características representadas en el modelo, la relación sílice/aluminio influyó negativamente en un 77.2%, es decir que a valores más altos de la relación la fracción limo más arcilla disminuyó; la capacidad de retención de humedad influyó en un 7.1%; la capacidad de intercambio catiónico, en un 14.4%; y la retención de fosfatos influyó negativamente en 1.3%.

De acuerdo con los valores obtenidos de la fracción limo más arcilla calculados se establecieron cuatro etapas de desarrollo de los Andisoles, las cuales corresponden con desarrollo escaso, moderado, fuerte y muy fuerte.

Por otro lado, se realizó un análisis pedogenético basado en los factores formadores de suelo. Cada factor se representó por un índice, el cual fue caracterizado por un valor paramétrico del 1-4, que coincidió con cada etapa de desarrollo propuesta. Los índices calculados derivados de las condiciones climáticas, del material parental y del relieve resultaron de suma utilidad, sin embargo, algunos índices no proporcionaron buena información tales como el de degradación biológica, el tipo de vegetación, la densidad de cobertura vegetal y el factor de erodabilidad, los cuales no mostraron un patrón definido en relación con el desarrollo de suelos.

En general, los índices asociados con el factor biótico son difíciles de evaluar y no reflejan claramente su influencia en el desarrollo del suelo, sin embargo representan un factor formador importante de suelos. Es conveniente investigar más profundamente sobre qué factores biológicos son más útiles en modelación.

En los suelos estudiados, la edad del material parental y la evolución de los suelos resultaron ser independientes ya que los depósitos más antiguos generaron suelos de escaso desarrollo. Por esta razón, en un estudio genético es más conveniente conocer la edad evolutiva del suelo que su edad absoluta, que pude no tener relación con el desarrollo real del suelo.

Vo.Bo.

Dr. Víctor Manuel Malpica Cruz

PEDOGENETIC MODEL TO ESTABLISH THE EVOLUTION AGE OF ANDISOLS

Solleiro Rebolledo Elizabeth

ABSTRACT

A model that indicates the development stage of soils derived from volcanic materials, especially volcanic ashes, is presented. The model and soil-forming factor information allow point out the genesis of a soil, its behavior and its evolution trend. The designed model is a lineal, multiple regression model, that it does not reflect the reality completely nevertheless it is representative of a researched phenomenon. The model can be managed easily because of its reduced number of variables.

The studied soils did not show a complete lineal trend. Nevertheless a lineal model was selected because in the initial and intermediate stages of development, the properties showed a strong lineal trend through time.

To build the model, 14 soils derived from volcanic materials, mainly ashes of different composition and age, were selected. They were from different climates (temperate, subtropical and tropical). Also, each of them represented one evolution stage, from poorly evolutionary soils, which were classified into Entisols, to strongly evolutionary soils that were classified into Andisols.

The variables that constitute model were selected considering the diagnostic properties of Andisols, doing and evaluation about their behavior through the profile. The variables selected were those that showed a linear trend. An analysis of correlation between physical, chemical properties and weathering indexes was done individually and by pairs, because it was necessary to take only those properties that showed minimal correlation values.

From the analyzed properties, the silica:aluminum ratio, the water-holding capacity to 1500 kPa, the cation exchange capacity, the relative development index (RDI), the silt plus clay fraction and the phosphate retention, reflected better the soil development. They gave correlation values greater than 0.75 in relation of the established soil-evolution sequence.

Of these characteristics the RDI and the silt plus clay fraction were selected as response variables and the rest properties as independent variables. Both parameters gave R^2 values of 0.61 and 0.69, respectively. Nevertheless they were considered because RDI is an index that is frequently used in different researches in soils and paleosols and the silt plus clay fraction because its proportion in the studied soils increased with age. Seven equations were obtained; of them it was selected the equation that took into account the silt plus clay fraction as a dependent variable.

From all these characteristics the silica:aluminum ratio had influence negatively in a 77.2% e.g. when this ratio increases the silt-clay ratio decreases; the water-holding capacity in a 7.1%; the cation exchange capacity in 14.4%; and the phosphate retention influence was -1.3%.

From the calculated silt plus clay fraction four development stages were established. Each of one reflects a low, moderate, strong and very strong development. On the other hand, pedogenetic analysis based in the soil-forming factors was done. Each factor was represented by an index, and each index was characterized with a parametric value form 1 to 4, representing each development stage. The calculated indexes derived from climatic conditions, from parent material and relief, were useful and mate with evolution trend showed by soils. However, some indexes do not give good information, such the biological degradation, the kind of vegetation, the density of vegetal cover and the erodability factor, which do not showed a defined development soil pattern.

The indexes associated with the biotic factor are difficult to evaluate and do not reflect clearly their influence in soil development, nevertheless they are important factor in soils. It was convene to know deeply about which factors could be used in modelation.

In the studied soils, the age of the parent material and the evolution of soils were independent because the older deposits generated low development soils. For this reason, in a genetic research is most useful to know about evolution age than absolute age that could not have relation with the real soil development.

Vo.Bo.

Dr. Víctor Manuel Malpica Cruz

RESUMEN

En este trabajo se presenta un modelo, que indica la etapa de desarrollo de suelos derivados de materiales volcánicos, específicamente de cenizas volcánicas, y que conjugado con la información procedente de los factores formadores, permite establecer la historia genética del suelo, su comportamiento y tendencia evolutiva. El modelo diseñado es un modelo lineal, de regresión múltiple, que, a pesar de no reflejar completamente la realidad, es representativo del fenómeno que se investigó. Además posee la ventaja de ser sencillo y de fácil manejo pues cuenta con un número pequeño de variables.

A pesar de que los suelos estudiados no mostraban un comportamiento completamente lineal, se eligió un modelo de este tipo, debido a que en las etapas iniciales e intermedias de desarrollo, hasta llegar a la madurez, la tendencia de cambio que llevan las propiedades de estos suelos a lo largo del tiempo, fueron prácticamente lineales.

Para la construcción del modelo se seleccionaron 14 perfiles de suelos derivados de materiales volcánicos, principalmente cenizas, de diferente composición y edad, pertenecientes a diversas condiciones climáticas (zona templada, subtropical y tropical). Además, cada uno de estos suelos representaba un estadio evolutivo diferente, desde los suelos menos evolucionados que aún se encontraban en el orden de los Entisoles, hasta los más desarrollados, los cuales son Andisoles con diferente grado de desarrollo.

Por su parte, las variables que integraron el modelo, se seleccionaron con base en las propiedades diagnósticas del orden Andisol, realizando una evaluación de su comportamiento a lo largo del perfil, ya que al ser un modelo lineal, se tomaron aquéllas propiedades cuyo comportamiento fuera prácticamente lineal. Asimismo, se realizó un análisis de correlación entre las propiedades físicas, químicas e índices de intemperismo por separado y en parejas, con el fin de tomar sólo las que arrojaron los valores de correlación más pequeños.

Así, de las propiedades analizadas, las que mejor reflejaron el desarrollo de los suelos fueron: la relación sílice/aluminio, la capacidad de retención de humedad a 1500 kPa, la retención de fosfatos y la capacidad de intercambio catiónico, las cuales arrojaron valores del coeficiente de correlación mayores que 0.75, en relación con la secuencia evolutiva establecida para los suelos. Por su parte, el índice de desarrollo relativo (DRP) y la fracción acumulada limo más arcilla arrojaron valores de R^2 de 0.61 y 0.69, respectivamente. A pesar de ello, se tomaron en cuenta para el modelo, dado que el DRP es un índice usado con frecuencia en diversas investigaciones de suelos y paleosuelos; y la fracción limo

más arcilla, porque al analizar su comportamiento de cambio con respecto a la edad de los depósitos, se observó un cierto aumento en su proporción, sobre todo en aquellos suelos en donde se presentan condiciones de clima subtropical.

Se obtuvieron 7 ecuaciones de regresión, de las cuales se concluyó que la que mejor reflejó el comportamiento de los Andisoles fue aquélla que consideró como variable de respuesta a la suma limo y arcilla, y como variables independientes a la relación sílice/aluminio, la capacidad de retención de humedad a 1500 kPa, la capacidad de intercambio catiónico y la retención de fosfatos.

De todas las características representadas en el modelo, la relación sílice/aluminio (Sa) influye negativamente en un 77.16%, es decir que a valores más altos de Sa, la fracción acumulada limo más arcilla disminuye; la capacidad de retención de humedad influye en un 7.10%; la capacidad de intercambio catiónico, en un 14.41%; y la retención de fosfatos influye negativamente en 1.33%.

De acuerdo con los valores obtenidos de la fracción acumulada de limo más arcilla calculados, se establecieron cuatro etapas de desarrollo de los Andisoles, los cuales corresponden con: desarrollo escaso, moderado, fuerte y muy fuerte.

Asimismo, se realizó un análisis genético con base en los factores formadores, los cuales fueron caracterizados con un valor que pudiera ser evaluado cuantitativamente, por medio de índices. A cada índice calculado se le asignó un valor paramétrico del 1 al 4, con el fin de que representaran cuatro etapas evolutivas y contar con datos de fácil correlación. Los índices relacionados con el clima, al igual que aquéllos referentes al material parental y al relieve resultaron útiles y coincidieron ampliamente con las tendencias evolutivas mostradas por los suelos.

Sin embargo, algunos índices no proporcionaron información valiosa, como es el caso del índice de degradación biológica, asociado a la degradación de la materia orgánica, el tipo de vegetación por área de cobertura, la densidad de cobertura vegetal y el factor K de erodabilidad, los cuales no mostraron un patrón definido en cuanto al desarrollo del suelo.

En general, los índices asociados a los organismos son de difícil evaluación, ya que no reflejan claramente su influencia en la evolución del perfil, a pesar de ser un factor muy importante en los suelos. Por ello, resulta conveniente investigar más a fondo qué clase de índices pudieran ser representativos para el modelo.

Con la información generada por el modelo: la fracción acumulada limo más arcilla y la procedente de los factores formadores, se encontró que los suelos estudiados representan las siguientes etapas de desarrollo:

Los suelos de los perfiles de Tala (Typic Ustorthent y Typic Eutrochrept), que se encuentran en la zona templada y se derivan de tobas ácidas, son suelos que están en la etapa I y van a alcanzar su máxima evolución en un tiempo muy largo y, quizá, nunca lleguen a constituirse como Andisoles. El perfil Chis (Vitrandic Udorthent), localizado en la zona tropical y derivado de cenizas volcánicas andesíticas, está en la etapa I, pero se considera que pronto se ubicará en otro estadio evolutivo, ya que su velocidad de pedogénesis es muy rápida. El perfil 63 (Typic Ustivitrand), presente en la zona subtropical, procedente de cenizas ácidas, está también en la etapa I y muestra una velocidad de pedogénesis lenta que lo lleva al desarrollo de suelos con propiedades mólicas, dentro de los grandes grupos de Andic Haplustolls. El perfil 110 (Typic Fulvudand), localizado en la zona subtropical, procedente de cenizas ácidas, está en la etapa II y se considera que su evolución es lenta por la alta estabilidad que poseen sus componentes organo-minerales. Los perfiles Si1 (Typic Hapludand), Si2 (Typic Hapludand), Si3 (Typic Udivitrand), 6 (Typic Udivitrand), bajo las mismas condiciones que los anteriores, se encuentran en la etapa II, y se espera que su evolución sea rápida. Los perfiles 2 (Eutric Hapludand) y 3 (Typic Hapludand), localizados en la zona templada y derivados de materiales volcánicos básicos, llevan una velocidad de formación moderada, que se encuentran en el mismo estadio de desarrollo (etapa III), pero cuya dirección evolutiva es diferente, ya que mientras el perfil 2 muestra una marcada tendencia a la eutrificación, el perfil 3 tiene características dístricas. Así, el perfil 2 es un intergrado hacia un Andic Hapludalf, mientras que el 3 puede derivar en un Typic Hapludult. Los perfiles Jal (Typic Hapludand, etapa III), 14 (Lithic Udivitrand, etapa II), 15 (Typic Hapludand) y 16 (Typic Hapludand, etapa IV), a pesar de pertenecer a diferentes etapas de desarrollo, se espera alcancen su punto máximo en poco tiempo, favorecida, principalmente por el clima (subtropical), acelerándose o atenuándose los procesos dependiendo de las condiciones de estación locales (relieve y material parental).

En los suelos estudiados, se observó que la edad de los depósitos fue independiente de la evolución que mostraron los perfiles, ya que los más antiguos (Tal y Tall) son los que tuvieron menor desarrollo. Es por eso que para fines genéticos es más útil contar con la edad evolutiva, que tener datos sobre edades absolutas que nada tienen que ver con el verdadero desarrollo de los suelos.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 La edad del suelo

La edad cronológica y evolutiva de los suelos es una variable de difícil evaluación, dado que son cuerpos dinámicos en evolución continua que, en algunos momentos llegan a un estado de cuasi equilibrio con las condiciones circundantes. Este equilibrio, los suelos de diferente génesis, lo alcanzan en diferentes tiempos, que varian desde 10^3 hasta 10^6 años, dependiendo de la naturaleza e intensidad de los procesos edafogénicos involucrados (Birkeland, 1984a; Catt, 1991). El estado de equilibrio o clímax del suelo se rompe fácilmente, a consecuencia de cambios climáticos y de vegetación, ya sea por efecto de fenómenos naturales catastróficos o antrópicos. De hecho se considera que el tiempo es un continuo donde se puede reconocer un "tiempo cero", referido al inicio de un ciclo de desarrollo del suelo (Buol et al., 1981).

Asimismo, existen propiedades que evolucionan rápidamente, como es el caso de aquéllas asociadas a la materia orgánica, cuya acumulación oscila entre 100 y 200 años (Arnold et al., 1992), y otras cuyo desarrollo es muy lento, como es el caso de las relacionadas con la alteración de minerales primarios. Estos últimos poseen diferentes velocidades de alteración, directamente relacionadas con su temperatura de cristalización, de acuerdo a la Serie de reacciones de Bowen. Ling Ong (1969) difiere de este concepto, considerando que el potencial de alteración se relaciona más con el grado de intemperismo químico, con la proporción de enlaces iónicos y con el contenido de SiO_2 en cada mineral. De hecho las investigaciones recientes, se enfocan en la explicación de la cinética química de intemperismo de los suelos, para entender mejor los procesos de destrucción química de los minerales a través del tiempo (Shoji et al., 1993b). Y así, para estimar la tasa de intemperismo químico, se ha optado por evaluar la concentración de aluminio extractable en oxalato ácido, dado que este elemento es uno de los que se presenta, principalmente en las tefras, y que resulta mejor índice que la acumulación de arcilla (Shoji et al., 1993a).

Una de las mayores dificultades para definir la edad de los suelos radica en que se tiene que tomar en cuenta la velocidad con que ocurren los procesos, en función de las condiciones climáticas y de la naturaleza del material parental, principalmente. Asimismo, hay que considerar que los suelos, en su etapa inicial evolucionan rápidamente hasta alcanzar un cierto grado de madurez y, posterioremente, su desarrollo es más lento, pero las oscilaciones climáticas o cualquier otro fenómeno origina que su pedogénesis se acelere, se mantenga o disminuya y, en casos extremos, se detenga (Retallack, 1984).

Otra de las preguntas básicas que no ha sido respondida hasta el momento, es hasta qué punto los suelos pueden ser considerados como recursos naturales

renovables. Teniendo información sobre la velocidad de formación de un suelo a partir de un cierto material parental, se podría aclarar esta interrogante. Las investigaciones realizadas al respecto, en suelos derivados de materiales volcánicos, han estimado tiempos mínimos de 100 años para la formación de un Andosol con un perfil C o (A)/C y más de 1500 años para formar un perfil A/B/C bajo condiciones de clima templado (Yamada, 1977). Otros autores señalan que un Andisol vítrico, derivado de ceniza predominantemente constituida por vidrio incoloro a una temperatura media anual de 10°C, puede formarse entre 200 y 300 años (Shoji et al., 1993b). Estos tiempos para la historia geológica son muy cortos, pero no para la vida humana.

De hecho, en general, son muy pocas las propiedades del suelo que pueden cambiarse y renovarse dentro de la escala de tiempo humana, ya que la mayor parte de ellas, incluyendo las más importantes (contenido y distribución de la materia orgánica, diferenciación textural, formación de minerales arcillosos, profundidad del perfil) no pueden producirse en tiempos cortos. Para que el suelo se constituya como un cuerpo con una estructura específica, un grado avanzado de desarrollo y una diferenciación del perfil horizontal y vertical, se requieren tiempos que van de 10^2 a 10^5 años (Arnold et al., 1992).

Así, resulta básico, contar con mayor información sobre la velocidad de pedogénesis y sobre la dirección en que ocurren las transformaciones bajo determinadas condiciones ambientales y de estación, que permitan establecer medidas de control y prevención a la degradación física, química y biológica de los suelos.

1.2 Modelos que determinan las etapa de desarrollo de un suelo

El tiempo de formación de un suelo es un concepto muy abstracto y arbitrario, basado, más que nada, en una necesidad humana. El tiempo no es un factor formador de suelo, ya que no produce un efecto en las características físicas, químicas o mineralógicas del sistema (Chessworth, 1973, en Birkeland, 1984; Johnson et al., 1988). Sin embargo, todos los procesos que ocurren en la naturaleza son dependientes de él y, necesariamente, debe ser considerado si se quiere establecer una historia genética más real y cuyas interpretaciones sean más confiables.

La estimación de la duración de los procesos edafogénicos, tradicionalmente, se ha basado en la medición de ciertos indicadores de desarrollo relativo, como son los índices de Bilzi y Ciolkosz (1977), Harden (1982), Birkeland (1984b), Phillips (1990, 1993a) y Birkeland et al. (1991), cuya determinación se realiza a partir de diferentes características dinámicas del suelo.

Estos índices proporcionan información valiosa sobre la edad de los suelos, considerando únicamente su carácter monogenético. No obstante, el desarrollo de un suelo no es un proceso unidireccional, sino que sigue una evolución progresiva y regresiva, tal que la primera propicia la horizontalización, la organización del perfil y su profundización, mientras que la evolución regresiva causa efectos contrarios, destruyendo características previamente formadas. De esta manera, una estimación más certera de la edad del suelo tendría que tomar en cuenta tanto los procesos progresivos como los regresivos a través de simulación matemática (Phillips, 1993a).

Existe una gran variedad de modelos matemáticos que pretende explicar la dependencia de los procesos edafogénicos con los factores formadores en función del tiempo (Jenny, 1941; Wilde, 1946; Ruhe, 1965; Runge, 1973; Jenny, 1980; Johnson y Rockwell, 1982; Johnson y Watson-Stegner, 1987: Phillips, 1990 y 1993b; Shoji et al., 1993a). Algunos de estos modelos, a pesar de utilizar el lenguaje matemático, son cualitativos o con una tendencia completamente teórica, ya que es difícil asignar valores reales a cada una de las variables involucradas y, en consecuencia, su solución no es muy viable.

Es por esta razón que existe la necesidad de desarrollar modelos que sean más acordes con la realidad y que, efectivamente, puedan ser aplicados a suelos reales y no teóricos. Además muchos de ellos, al tratar de modelar al suelo, requieren tanto tiempo que cuando se obtiene un resultado, éste no coincide con el objetivo planteado. Por otro lado, al modelar el sistema real, hace falta una gran cantidad de información, que, en ocasiones, no se encuentra disponible, tal que su utilidad disminuye. Por esta razón, los resultados prácticos que proporcionan modelos con una gran cantidad de variables no son más útilles que un modelo claro y sencillo. A veces, los modelos son tan complejos que resultan incomprensibles para el edafólogo y nunca llegan a usarse, ya que el suelo tiene un comportamiento no lineal y estocástico y, consecuentemente, se define en términos de derivadas parciales de difícil manejo. Así, el modelo que mejor describe al suelo es aquél que ejemplifica de manera clara y sencilla sus tendencias y líneas evolutivas.

1.3 Definición de Andisoles

Los Andisoles (Soil Survey Staff, 1990), Andosoles (FAO-UNESCO, 1974) o Kurobokudo (The Third Division of Soils, 1973), son suelos derivados de materiales volcánicos, principalmente cenizas; aunque también llegan a formarse a partir de otros materiales piroclásticos, de rocas basálticas, e inclusive, en regiones tropicales, de materiales no volcánicos: loess, argilita y productos de intemperismo ferrálico (FAO-ISSS-ISRIC, 1994) con la única condición de que estos materiales presenten una alteración bastante rápida. Esta condición es necesaria para la formación de los minerales amorfos o de "intervalo corto"

(Wada, 1989; Childs y Whittan, 1990) como el alofano, la imogolita o la ferrihidrita los cuales proporcionan a los Andisoles gran parte de sus propiedades diagnósticas.

Para que se sinteticen esta clase de minerales es necesario que los materiales parentales posean una gran superficie específica que permita el ataque inmediato de los agentes del intemperismo físico y químico, con la consecuente hidrólisis de la ceniza volcánica. Asimismo, es importante la existencia de un edafoclima donde imperen condiciones de alta lixiviación, lo que implica alta humedad durante todo el año, o con periodos de sequía muy cortos (Ewaga, 1977; Duchaufour, 1984; Parfitt, 1990). Si los periodos de humedad se alternan con periodos de sequía demasiado largos, los minerales amorfos cristalizan irreversiblemente, de tal suerte que el resultado no es la formación de Andisoles (FitzPatrick, 1984; Singer, 1990; Parfitt, 1990).

La materia orgánica es otro de los agentes que controlan la dirección del proceso de andosolización al formar complejos con el Al^{+3} y el Fe^{+3} y con los minerales amorfos (Wada, 1985), lo que permite el desarrollo de un horizonte A de color negro, de gran espesor. Tanto los amorfos como el Al^{+3} y el Fe^{+3} estabilizan las sustancias húmicas haciéndolas insolubles y resistentes a la descomposición (Ugolini et al., 1988). Sin embargo, al variar alguna de las condiciones ambientales iniciales, el proceso sufre modificaciones derivando en la formación de otras clases y tipos de suelos. Las secuencias de transformación de Andisoles a otros suelos son muy comunes como consecuencia de las variaciones locales de clima, microclima, relieve, material parental, vegetación o edad (Shoji et al, 1990; Shoji et al., 1993a). De hecho, los materiales amorfos representan una fase de evolución intermedia entre los minerales primarios inalterados de la roca madre y los minerales secundarios productos de la alteración de los anteriores.

En los Andisoles se puede observar, de una manera más o menos clara, los cambios que sufren en su evolución. Asimismo, se ha considerado que el tiempo cero de formacion de suelos coincide con el periodo de depósito de ceniza, ya que el intemperismo químico comienza casi inmediatamente después de que éste ocurre (Shoji et al., 1993b). De hecho se les considera como una etapa transicional entre los suelos poco desarrollados derivados de cenizas volcánicas (Entisoles) y los suelos "maduros" de los órdenes Molisol, Alfisol, Ultisol y Oxisol (Kimble y Eswaran, 1988; Van Wambeke, 1991; Shoji et al., 1990; Shoji et al., 1993a). Por esta razón se ha considerado de gran utilidad emplearlos como un "laboratorio" natural, en el que se observen las modificaciones que se originan en el sistema como consecuencia de los cambios en la pedogénesis ya sea por causas naturales o derivadas del manejo antrópico.

Como se ha mencionado, las propiedades físicas y químicas de los Andisoles están principalmente influenciadas por el tipo de material parental y el régimen de

humedad. Los piroclastos, no cristalizados, ricos en elementos de fácil alteración, son los materiales que favorecen el desarrollo de la andosolización. En este sentido, no sólo resulta importante la composición, sino el tipo de depósito, es decir su distribución y espesor.

Lo anterior se refiere a que existen tres tipos de depósitos de piroclastos: los de caída libre "ash fall", los de flujo "ash flow" y los de las oleadas piroclásticas o "surges". Esta diferencia en la forma en que se depositan origina que el espesor de las acumulaciones y su distribución a lo largo del relieve varíe en cada caso, aún cuando las emanaciones tengan la misma fuente y edad (Yamada, 1977).

Los depósitos de "ash-fall" se extienden por grandes áreas cubriendo la topografía existente. A diferencia de ellos, los depósitos de "ash-flow" están condicionados por la pendiente y su composición es comúnmente rica en sílice o es de naturaleza intermedia, lo que impide el desarrollo del perfil de suelo, señalándose que son suelos inmaduros "shirasu" (Yamada op cit.). Por lo general, este tipo de piroclastos se encuentra rellenando cañones, cañadas y los bajos topográficos, además de ser material con poca clasificación de las partículas, aumentando su espesor en las partes distales de la fuente, si bien el espesor se debe a las irregularidades topográdicas. Generalmente, sobre los materiales piroclásticos se forma un perfil poco diferenciado del tipo A/C, mientras que sobre rocas duras la evolución es más lenta, formándose un horizonte (B) y constituyendo un perfil del tipo A(B)C (Duchaufour, 1984).

Con respecto a la edad de los Andisoles, Yamada (1977) y Shoji et al. (1993a) señalan las siguientes edades para la diferenciación de los horizontes de un Andisol, con un clima húmedo y un material parental básico:

A (húmico)/C	algunos cientos de años
A (húmico)/Bw (de color)/C	de 100 a 1000 años
A (húmico)/Bw (cámbico)/C	de 1000 a algunos miles de años
A (melánico o fúlvico)/Bw (cámbico)/C	algunos miles de años o más

1.4 Los Andisoles en el mundo y México

Los Andisoles ocurren en muchas de las regiones volcánicamente activas y no activas del mundo, ocupando alrededor de 160 $X10^6$ ha (FAO-UNESCO-ISRIC, 1994, Fig. 1.1). Ejemplos de ellos se muestran en los trabajos realizados por Simonson y Rieger (1967) en Alaska; Quantin (1985) en el Archipiélago de Vanuatu; Quantin et al. (1985) en Italia; Parfitt y Wilson (1985) en Nueva Zelanda; Otsuka et al. (1988) en Filipinas; Martini y Luzuriaga (1989) en Costa Rica; Ugilini et al. (1988) y Shoji et al. (1990, 1993) en Japón y McDaniel et al. (1993) en Estados Unidos.

Por su parte, México posee una vasta extensión de zonas volcánicas en la Franja Volcánica Transmexicana, las Sierras Madre Occidental y del Sur. De acuerdo con la estimación de Aguilera (1969), los suelos derivados de cenizas y materiales volcánicos cubren aproximadamente, una cuarta parte (490,750 Km^2) de la superficie total del territorio nacional (Fig. 1.2). FAO-UNESCO (1976) considera que los Andosoles junto con los Kastañozems, los Litosoles y los Luvisoles son los suelos más abundantes de México, abarcando el 62% de las vítricos ocupan una superficie de 70,668 Km^2. Al parecer, los Andisoles se encuentran, principalmente, en la Franja Volcánica Transmexicana (Etchevers, 1985).

Los trabajos que existen en México sobre Andisoles son abundantes, destacando los realizados por Aguilera (1961, 1963, 1965, 1969), Cortés (1966), Aguilera et al. (1970), García (1970 y 1984), Miehlich (1980), quienes aportan conocimientos valiosos sobre la génesis, clasificación y mineralogía de diferentes Andisoles. Otros aspectos que se han considerado en los trabajos de Andisoles son sus características físicas y químicas (Guajardo, 1967; Peña, 1978; Cajuste, 1979; García, 1970 y 1984; Etchevers, et al., 1986, Valera, 1993); y su fertilidad y manejo (Turrent, 1962, Etchevers, 1985).

Una buena parte de estos suelos se encuentra ubicada en las zonas tropical y subtropical por lo que es muy importante contar con información que sea aplicable a las condiciones que en ellas prevalecen.

1.5 Objetivo.

El objetivo principal de esta investigación es el desarrollo de un modelo que, a través de parámetros derivados del análisis de las propiedades físicas, químicas, morfológicas y de índices de desarrollo y alteración de los suelos de interés, permitan:

a. Establecer la etapa de desarrollo de los Andisoles,
b. Inferir la duración de los procesos edafogénicos
c. Predecir, bajo las condiciones actuales, la dirección de su evolución
d. Contar con información que pueda ser aplicable a otros suelos y paleosuelos.

En el caso de paleosuelos es importante contar con la información mencionada, ya que mediante ella se puede inferir la duración de los periodos de estabilidad ambiental bajo los cuales se constituyeron estos sistemas. Dado que la formación de un suelo está relacionada con un hiatus en la columna estratigráfica, para conocer mejor la historia geológica de una región, es indispensable establecer las

condiciones reinantes así como la duración de los procesos, obtenidas a través del estudio edafogenético.

1.6 Justificación

Los Andisoles representan un potencial natural, importante para la agricultura nacional, además de ser sustento de los recursos forestales de nuestro país. Sin embargo, son sistemas frágiles por naturaleza, que en su mayoría son susceptibles a la degradación, incluyendo la erosión hídrica y eólica. Por esta razón se considera necesario estudiar a fondo su génesis, velocidad de formación y directrices de evolución, que permitan formular mejores prácticas de manejo, uso y conservación. Asimismo, es indispensable determinar el tiempo que requieren para formarse y pronosticar los intergrados de evolución hacia los cuales se dirigen, bajo condiciones ambientales específicas. De esta manera, las prácticas de conservación podrán diseñarse en condiciones más acordes con la realidad.

1.7 Hipótesis

Se considera que los Andisoles son suelos en evolución continua, que los ubica como un intergrado entre diferentes unidades de suelo. El conocer su edad evolutiva permitiría determinar su velocidad de formación, su dirección de evolución y hacer predicciones sobre su comportamiento a futuro.

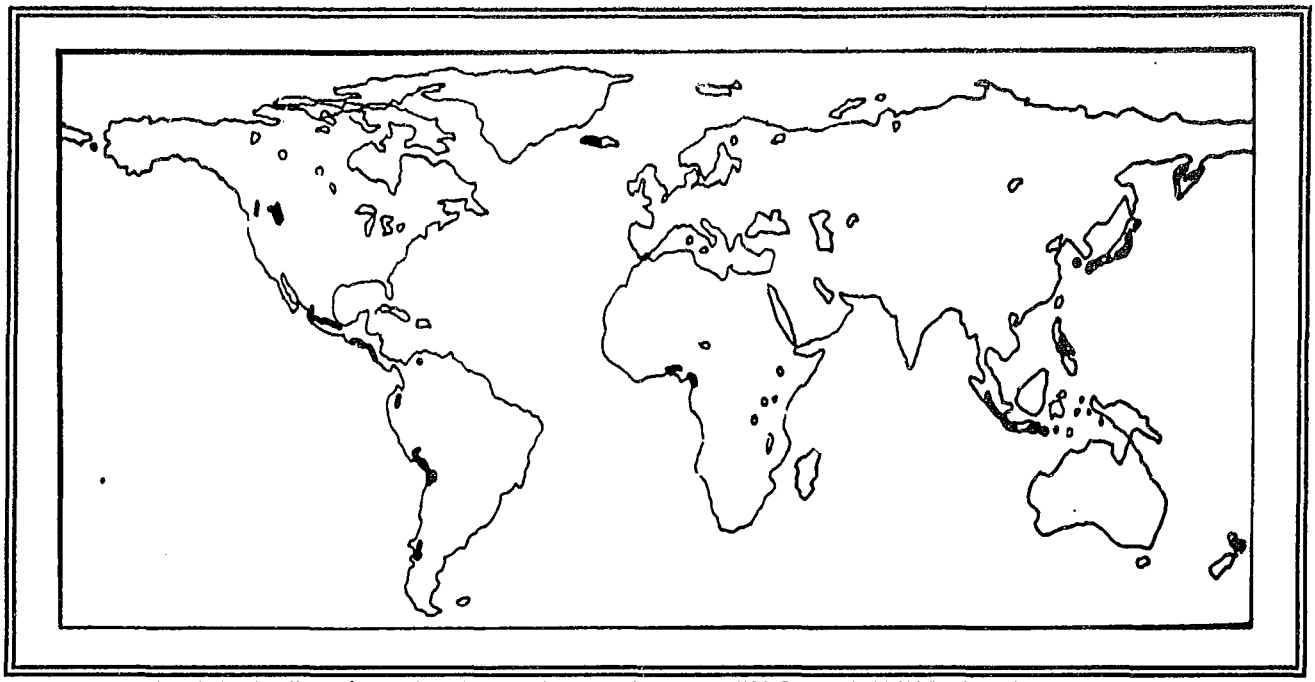


Fig. 1.1 Distribución de los Andosoles en el mundo (FAO-ISSS-ISRIC, 1994)

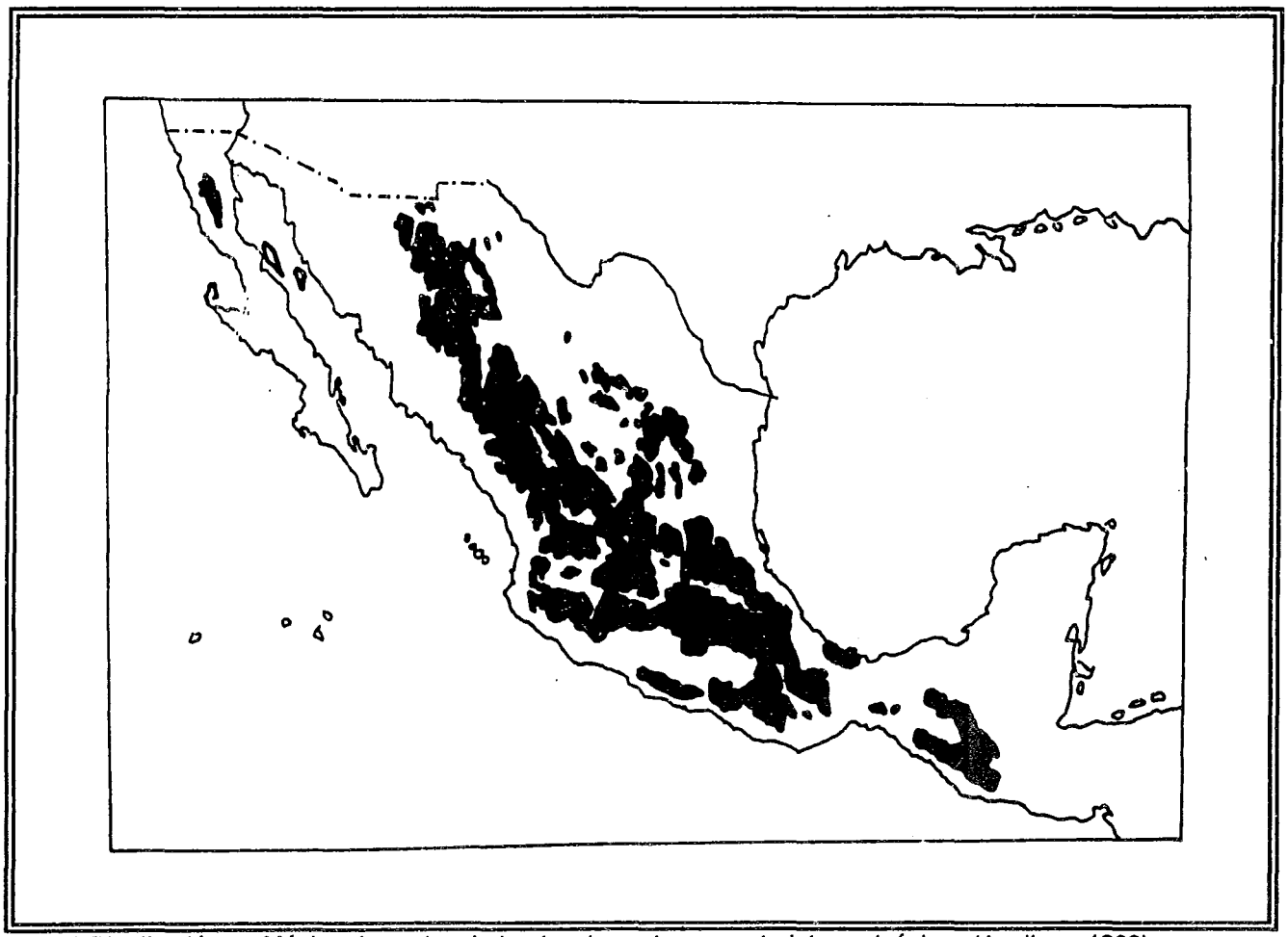


Fig. 1.2 Distribución en México de suelos derivados de cenizas y materiales volcánicos (Aguilera, 1969)

II. METODOLOGÍAS Y MODELOS SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LOS SUELOS

2.1 Métodos para medir la edad de los suelos

Aún cuando el tiempo de formación de un suelo es un parámetro de difícil evaluación, es posible estimar su edad con base en ciertos datos. Tal información se desprende del análisis de los siguientes aspectos: (1) la etapa relativa de desarrollo del sistema; (2) el complejo de alteración e intemperismo; (3) el fechamiento directo de horizontes y perfiles (fechamiento absoluto); (4) los experimentos realizados en campo y laboratorio; (5) los fósiles y la posición estratigráfica.

2.1.1 Métodos concernientes a la etapa relativa de desarrollo

Es posible estimar el tiempo de formación de los suelos por medio del conocimiento de su historia evolutiva, lo que involucra un análisis morfológico, físico, químico y mineralógico del perfil, así como de las características de los factores formadores (clima, organismos, material parental, relieve).

Los procesos relacionados con la dinámica de la materia orgánica (procesos bioquímicos), donde la humificación es predominante, son de corta duración en climas trópicales y subtrópicales y, por lo tanto se les considera como de ciclo corto (Duchaufour, 1984). A diferencia, aquellos suelos en donde impera la alteración geoquímica son producto de procesos de ciclo largo. Sin embargo, ambos procesos (bioquímicos y geoquímicos) se encuentran relacionados, ya que en las etapas iniciales de desarrollo puede dominar un proceso de ciclo corto y la evolución posterior llevarse a cabo en un tiempo mucho mayor.

Así, se considera que los horizontes humíferos se desarrollan rápidamente. El estado de equilibrio en estos horizontes se alcanza en un tiempo de 200 a 10,000 años, dependiendo de las condiciones bioclimáticas locales (Birkeland, 1984). Otras investigaciones han mostrado que dicho equilibrio es alcanzado en un periodo de 600 a 1,500 años, según la naturaleza de la vegetación y la composición química del material original (Duchaufour, 1984). Los tiempos estimados para la formación del mull ándico (método de ^{14}C) son de 4,000 años, mientras que para un Chernosem son de 1,000 años. Esta diferencia de tiempo es consecuencia del bloqueo de mineralización que produce el alofano en los Andisoles.

Por su parte, como ya se ha mencionado, los tiempos estimados para la diferenciación del perfil de un Andisol son: menos de 100 años para tener un perfil C o (A)/C; de 100 a 500 años para un perfil (A)/C, A/C o A/(B)/C; entre 500 y 1,500 años para un perfil A/(B)/C o A/B/C; y más de 1,500 años para un perfil

A/B/C (Yamada, 1977). Las edades que proponen Shoji et al. (1993a) son semejantes: A (húmico)/C, algunos cientos de años; A (húmico)/Bw (de color)/C, de 100 a 1000 años; A (húmico)/Bw (cámbico)/C, de 1000 a algunos miles de años; A (melánico o fúlvico)/Bw (cámbico)/C, algunos miles de años o más.

Claro que las edades mencionadas son sólo aproximadas y no deben ser extrapoladas, ya que existen diferencias dependiendo de las condiciones locales del tipo de clima ambiental, clima del suelo, tipo y composición del material parental, tipo de vegetación y características específicas del relieve.

Un horizonte cámbico tarda más tiempo en formarse que uno humífero, dado que su edafogénesis involucra la alteración geoquímica de los materiales. Por otro lado, la formación de un horizonte argílico se efectúa en un tiempo mayor, ya que los procesos de acumulación, neoformación y traslocación de arcilla son más lentos (Yaalon, 1971; Duchaufour, 1984; Birkeland, 1984.; Arnold et al., 1992).

Así, la diferenciación del perfil y el tipo de horizontes que se encuentren pueden indicar el tiempo que ha requerido el suelo en formarse. Sin embargo, sumada a esta información se pueden obtener índices de formación de suelos, que involucran el desarrollo de sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas. Entre tales índices de formación destacan:

a. Color del suelo. Se ha observado que los suelos antiguos son más rojos que los suelos jóvenes (Ruhe, 1965). Claro que al generalizar, debe considerarse que en climas tropicales el proceso de rubificación es más acelerado que en climas fríos y secos, por lo que este criterio puede ser muy subjetivo. Algunos autores consideran que dicho proceso es fósil (Retallack, 1991; Wright, 1991), por la deshidratación y crecimiento de cristales de óxidos e hidróxidos de hierro después del sepultamiento del suelo.

b. Índice de desarrollo relativo del perfil. Este índice se basa en las características morfológicas de los suelos, medidas en campo y laboratorio, mediante el sistema desarrollado por Bilzi y Ciolkosz (1977). En cada horizonte del suelo se miden aquellas propiedades que cambian con el tiempo (color, textura, estructura, consistencia, cutanes, límites entre horizontes) y se comparan con las mismas del horizonte C, o entre horizontes, asignándoles un punto por cada razón de cambio. De esta manera, se obtiene un valor relativo que representa cualitativamente el o los horizontes que han adquirido mayor desarrollo.

c. Índice de Harden. Al igual que el índice anterior, el índice de Harden (1982) mide los cambios ocurridos en las propiedades del perfil, pero las comparaciones se hacen con respecto al material parental y las variaciones se normalizan a una escala de 10. Una de las dificultades de emplear este índice se deriva del hecho que el material parental, en muchas ocasiones, no está representado en el perfil,

por lo que se debe buscar en otros sitios donde se encuentren las mismas condiciones pedogenéticas.

d. Índice modificado de Harden (Birkleland et al., 1991). Este índice, también señala cuantitativamente, que tanto difieren las propiedades del suelo de las del material parental asignando intervalos de 10 puntos por cada razón de cambio y normalizando los valores al dividirlos entre el máximo valor de cambio. Asimismo, se suman estos valores normalizados y se dividen entre el número de propiedades consideradas y se multiplica por el espesor del horizonte. Finalmente, todos los valores de cada horizonte se suman y se obtiene un índice de desarrollo del perfil.

e. Índices mineralógicos. Existen diversos índices relacionados con la mineralogía de los suelos, todos ellos basados en las secuencias de alteración establecidas por diferentes autores (Goldich, 1938; Jackson, 1968; Pettijohn, 1973). Algunos de estos índices mineralógicos se basan en la composición y tamaño de las arenas (Soller y Owens, 1991), considerando más que secuencias de alteración asociaciones mineralógicas (Chessworth, 1977). Otros más consideran la mineralogía de las arcillas, ya que se sabe que estos minerales evolucionan con el tiempo hasta alcanzar condiciones termodinámicas más estables. Así, una mica del tipo de la biotita comienza su transformación constituyendo una mica hidratada que se transforma, posteriormente, a ilita-vermiculita y, finalmente, a esmectita y quizá a caolinita o gibsita (Auboin et al., 1984).

2.1.2. Métodos relacionados con el complejo de alteración e intemperismo

a. Complejo de alteración. El complejo de alteración de un suelo se considera como el mejor testigo de la naturaleza y grado de avance de la edafogénesis (Duchaufour, 1984). De hecho, los factores que lo afectan incluyen la intensidad de intemperismo y la inercia edafológica, es decir la resistencia del suelo al cambio (Buol et al., 1981). El complejo de alteración está constituido por el contenido de arcilla, el porcentaje de saturación de bases, el contenido de hierro libre y el porcentaje de carbono orgánico. El contenido de arcilla está directamente relacionado con los procesos de argieluviación, transformación de minerales primarios, neoformación y arrastre. El porcentaje de saturación de bases indica procesos de lixiviación por arrastre de cationes básicos intercambiables (calcio, sodio, potasio y magnesio). El contenido de hierro libre es índice de alteración ya que su porcentaje aumenta con el intemperismo y la edad del suelo (Buol et al., 1981). El contenido de carbono orgánico evidencia procesos relacionados con la acumulación y alteración de la materia orgánica en el suelo.

b. Índices de intemperismo. Estos índices permiten inferir el grado de alteración, intemperismo y evolución que han alcanzado los minerales en el suelo, midiendo

los relaciones molares de óxidos totales presentes en cada uno de los horizontes. Entre las relaciones más importantes se encuentran: sílice/aluminio, sílice/sesquióxidos, bases/sesquióxidos, índice de lixiviación e indice de intemperismo de Parker (Jenny, 1941; Colman, 1982)

c. Balances geoquímicos y mineralógicos. Este método (Krauskopf, 1979) tiene por objeto hacer una comparación entre la composición de cada horizonte del perfil y la del material parental, asumiendo que es homogéneo. Como muchas de las propiedades del suelo cambian con el tiempo, es necesario efectuar las comparaciones a través de un elemento invariable y, principalmente, estable. Así, en estos análisis se emplea el cuarzo en rocas graníticas (Souchier y Lelong, 1972) o en rocas de diferente composición, el aluminio (Heitier, 1975), aunque es preferible utilizar el titanio, más estable pero menos común que los anteriores.

2.1.3 Fechamiento directo de horizontes y perfiles.

Los métodos de fechamiento directo de los suelos son muy útiles para ciertos estudios, pero proporcionan una edad única que puede corresponder a cualquiera de las etapas de formación del suelo (la primera, la intermedia o la final). Sin embargo, puede ser tomada como herramienta de interpretación y correlación, y es de gran importancia en la estratigrafía de suelos y paleosuelos. Entre los principales métodos de fechamiento directo se encuentran los siguientes:

a. Método de fechamiento de los anillos de los árboles. La edad absoluta de los suelos se puede establecer por medio del análisis de la edad de los árboles a través del conteo de sus anillos, y es especialmente útil en suelos muy recientes, Este método ha sido utilizado en suelos de California, obteniéndose edades de 27 a 1,200 años, evaluándose los troncos de pinos (Dickson y Crocker, 1954) asumiendo que la edad del árbol es contemporánea a la del suelo que lo sustenta. Sin embargo, la edad de este último puede ser muy diferente si se considera que los procesos edafogénicos comienzan aún antes de instalarse cualquier vegetación pionera.

b. Método de ^{14}C. Este es uno de los métodos más comúnmente utilizados para fechar suelos, y, a pesar de ser cuantitativo, en ocasiones es impreciso, ya que existe una cierta edafoturbación que modifica las condiciones iniciales. Asimismo, la expansión de los materiales arcillosos origina que los restos orgánicos se trasloquen y no den resultados confiables. Este método se basa en el principio de que la materia vegetal viva contiene pequeñas cantidades del isótopo ^{14}C, el cual disminuye cuando la materia vegetal muere (se fosiliza y humifica). En algunos suelos los resultados son muy precisos, sobre todo en aquéllos en que la materia orgánica es casi inerte. No sucede lo mismo en los suelos donde la materia orgánica se renueva continuamente. En tales casos, la edad proporcionada por el método puede corresponder a la edad de los materiales aportados recientemente.

Así, uno de los mayores problemas que se presenta es el de contaminación por materiales ajenos al proceso formativo (más jóvenes o más antiguos). Asimismo, actualmente la polución también produce efectos en el carbono de los suelos que no pueden ser ignorados. Se han llevado a cabo algunos experimentos para corregir el problema de contaminación, empleando la técnica del ASM (Aceletator Mass Spectrometry), la cual permite la extracción de componentes puros de las muestras que se van a analizar, a través de un filtro ultrasensible. Dicho filtro emplea iones negativos, de tal forma que pueden medirse radios atómicos del orden de 10^{-17} con muestras de 1 mg o menos (Geyh y Schleicher, 1991). Esta es una técnica innovadora pero de poco uso debido a sus costos elevados.

c. Método de termoluminiscencia. Esta técnica se ha usado con mayor frecuencia para obtener la edad de piezas arqueológicas (Geyh y Schleicher, 1991) aunque también se ha empleado para determinar la edad de: (1) Sedimentos asociados a suelos (Wintle y Huntley, 1982); (2) Suelos derivados de depósitos de loess (Wintle et al., 1984; Wintle y Catt, 1985); (3) Suelos sepultados (Hütt et al., 1993); y (4) Depósitos relacionados con suelos policíclicos (Dijkmans et al., 1993), aunque la inconsistencia de los resultados obliga a ampliar los análisis a otros suelos.

El método se basa en que los defectos en la estructura cristalina de los minerales forman trampas con déficits de carga positiva o negativa, relacionados con niveles de energía "prohibidos". Cuando los cristales quedan expuestos a ciertas dosis de radiación, los electrones quedan atrapados en las trampas. De esta forma, se infiere que el número de trampas aumenta linealmente con la dosis de radiación, asumiendo que, inicialmente, no estaban ocupadas por ningún electrón (Geyh y Scheleicher, 1991). Los materiales que se emplean en esta técnica son aquéllos que han estado bajo el efecto de fuertes dosis de radiación, como es el caso de suelos sepultados bajo materiales volcánicos, o bien cuya energía residual se puede medir. La edad que se obtiene es la edad de sepultamiento del horizonte superior (Wintle y Catt, 1985).

d. Fechamiento U-Th de carbonatos. Esta técnica se basa en la relación de desequilibrio entre Th^{230}, U^{234} y U^{238} que existe en las concresiones de carbonato pedogénico (Ku et al., 1979). La edad estimada es de hasta 320,000 años, sin embargo, al igual que en el método de ^{14}C se presenta el problema de contaminación por otras fuentes.

Cuando el carbonato se forma, se incorporan algunas partes por millón de uranio e insignificantes cantidades de torio. Posterior a su formación, el carbonato actúa como un sistema cerrado con respecto a los isótopos de uranio y torio, tal que la edad del carbonato se calcula con la siguiente fórmula:

$^{230}Th = {}^{238}U\ (1-e^{-\beta ot})$
donde βo es la constante de decaimiento del ^{230}Th ($9.22X10^{-6}$ /años)

Debido a que en soluciones naturales de ^{238}U se encuentra un exceso de ^{234}U la ecuación anterior se modifica a:

$^{230}Th = {}^{234}U\ (1-e^{-\beta ot}) + ({}^{234}U + {}^{238}U)(\beta o/\ (\beta o - \beta_4))$
donde β_4 es la constante de decaimiento del ^{234}U ($2-7X10^{-6}$ /años)

2.1.4 Métodos experimentales Este método consiste en la reproducción de las condiciones naturales en laboratorio, con el fin de medir la velocidad de los procesos bajo condiciones de intemperismo acelerado. Destacan en el desarrollo de técnicas experimentales los trabajos de Pèdro (1964), Pèdro y Bitar (1966), Robert (1970), Lohm (1989), entre otros.

2.1.5 Métodos indirectos

a. Fósiles. La Palinología es una herramienta que puede utilizarse para determinar la edad de un suelo, asociándolo con los paleoclimas y estableciendo las fases de su evolución. El estudio del polen fósil permite reconstruir los cambios climáticos, el reconocimiento de la sucesión de flora y su relación directa con las etapas de desarrollo de los suelos. Sin embargo, en muchas ocasiones, el estudio palinológico se ve limitado por la contaminación que se da en los suelos de restos polínicos alóctonos o bien por el metamorfismo que sufren los granos de polen por eventos catastróficos.

b. Fitolitos. Estas formaciones se originan a partir de los residuos vegetales que secretan ciertas cantidades de ópalo y que, al morir, permanecen en el suelo. Los fitolitos son muy persistentes en los suelos, habiéndose encontrado algunos de hasta 13,000 años, de acuerdo a fechamientos realizados con ^{14}C (Birkeland, 1984).

c. Posición estratigráfica. El periodo de formación de un suelo puede estar determinado por su posición estratigráfica con respecto a los sedimentos y rocas que le subyacen o, en el caso de suelos sepultados, que le sobreyacen. La edad del suelo corresponde al intervalo comprendido entre la edad del material inferior y la edad del material que sepulta al suelo, aunque ésto es sólo una suposición, ya que, en este caso se considera que los procesos pedogénicos comenzaron al tiempo de formación de la roca que se encuentra debajo y que terminaron con el depósito de nuevos materiales. En suelos superficiales, la evaluación es más difícil porque los intervalos que se propongan no pueden ser comprobados, al limitarse la correlación estratigráfica.

d. Cronofunciones. El tiempo que tarda un suelo en formarse puede ser estimado con ayuda de cronofunciones o relaciones matemáticas entre el tiempo y ciertas propiedades del suelo. Las cronofunciones se establecen midiendo las propiedades individuales del suelo en una secuencia de perfiles (cronosecuencia). Se han reconocido cuatro tipos de cronosecuencias: postincisivas, preincisivas, transgresivas en tiempo con traslape histórico y transgresivas en el tiempo sin traslape histórico (Vreeken, 1975). Estos nombres se refieren a la secuencia evolutiva del suelo desde el inicio de su formación hasta su desarrollo actual o final, a consecuencia del sepultamiento.,

Una de las relaciones matemáticas que se han utilizado para medir cronofunciones es la propuesta por Bockheim (1980), quien emplea la siguiente ecuación logarítmica: Y= a+blogX, donde Y es una propiedad del suelo, X es el tiempo y a y b son coeficientes de correlación, los cuales son significativos estadísticamente en un 85%. Más recientemente se tienen los trabajos de Shoji et al. (1993a), quienes proporcionan ecuaciones lineales entre el aluminio extractable con oxalato ácido y la edad, con un coeficiente de correlación del 95%.

2.2 Los modelos como una herramienta para estimar la evolución de los suelos

La medición de la duración de los procesos edafogénicos es sumamente compleja debido, principalmente, a: (1) su alto grado de variabilidad; (2) la presencia de una evolución que no es unidireccional, con procesos progresivos y regresivos dentro de un mismo suelo que puede derivar en un comportamiento caótico (Phillips, 1993a); (3) una gran cantidad de parámetros involucrados, donde convergen procesos endógenos (aquéllos directamente relacionados con la pedogénesis: horizontalización, estructuración, cambios de pH) y exógenos (procesos ajenos al sistema suelo, donde destacan factores ambientales, perturbaciones por incendios o tala de bosques, flujos de calor, agua o aire, etc.) (Johnson et al. 1990); (4) que el suelo es un sistema termodinámico abierto no en equilibrio, cuya simulación matemática es complicada (Karathanasis, 1989); y (5) el suelo es un sistema no lineal de tal modo que las relaciones entre los flujos de entradas y salidas de materiales y energía no son proporcionales (Phillips, 1993b).

A pesar de lo anterior, la simulación matemática ha representado una buena opción para obtener los vectores de desarrollo de los suelos, que reflejan de una manera integral los factores, procesos y condiciones que dirigen la pedogénesis, proporcionando al sistema ciertos patrones de variabilidad en el espacio y dinámica en el tiempo(Johnson y Watson-Stegner, 1987). Sin embargo, para contar con un buen modelo, es necesario considerar que debe estar basado en la

termodinámica de sistemas abiertos, haciendo aproximaciones sucesivas para definir su comportamiento (Karathanasis, 1989).

Cabe señalar que, bajo ciertas condiciones, el suelo también puede comportarse como un sistema cerrado en cuasi equilibrio, como son aquéllas presentes en los suelos con drenaje restringido, lo que se observa en suelos arcillosos, fragipanes o montmoriloníticos, ya que en estas condiciones se observa un largo tiempo de residencia de la solución del suelo dentro del sistema (Karathanasis, op cit.), derivando en el control de la actividad de los iones. En este caso la simulación se vuelve un poco más sencilla, pero su aplicación es sumamente limitada.

Por otro lado, tomando la ecuación de Jenny (1941), la cual simula la pedogénesis a través de un modelo factorial de estado, se destaca que la mayor complejidad en la cuantificación de los factores radica en su interdependencia con el factor tiempo (Yaalon, 1975). Sin embargo dicha ecuación sigue siendo básica como un modelo conceptual (Birkeland, 1984; Phillips, 1989).

Así, resulta más interesante definir el comportamiento del suelo a través de la teoría de los sistemas dinámicos no lineales (NDS), donde el tiempo se toma en cuenta como un factor dinámico e independiente (Phillips, 1993b). La ventaja de utilizar esta teoría consiste en la posibilidad de contar con información sobre la dirección evolutiva del suelo, tal que se examine si existe divergencia en el tiempo o una dependencia sensible a las condiciones iniciales y si esta dependencia es consecuencia de condiciones caóticas o de perturbación, o es parte del desarrollo natural del suelo (Phillips, 1993b). En otras palabras se trata de definir en qué medida el sistema suelo posee un comportamiento caótico, resultado de la conjunción de fuerzas estocásticas y la heterogeneidad de los controles ambientales, tan numerosos. De hecho, estudiando las perturbaciones se puede obtener información sobre el caos.

Aplicando el concepto de la teoría de sistemas dinámicos, se puede caracterizar al suelo resolviendo una serie de ecuaciones diferenciales ordinarias, cuyas variables se pueden medir de diferentes maneras (Phillips, op cit.):

$ds/dt=f_s(cl,o,r,p)$
$dcl/dt=f_{cl}(s,o,r,p)$
$do/dt=f_o(cl,s,r,p)$
$dr/dt=f_r(cl,o,s,p)$
$dp/dt=f_p(cl,o,r,s)$

donde, s= suelo, cl= clima, 0= organismos, r=relieve,
p= material parental.

Con estas ecuaciones, un sistema que se encuentra cercano al equilibrio sería aquél que no cambia o cambia muy poco con respecto al tiempo ($dx_i/dt=0$), mostrando un comportamiento asintótico, es decir que tiende a cero. En estos sistemas, las perturbaciones son prácticamente nulas.

Como es notorio, el tratamiento matemático de un sistema dinámico y abierto, no en equilibrio, es bastante complicado. Sin embargo, como ya se ha apuntado, se puede manejar con el modelo factorial (S=f(cl,o,p,r,t)), definiendo a cada una de las variables en términos de alteraciones pedogénicas. Así, S se puede definir a través del grado de desarrollo del suelo con índices como los de Bilzi y Ciolkosz (1977), Harden (1982), Birkeland (1984b), Phillips (1990, 1993a). El clima se puede definir con algún índice de agresividad climática que defina la influencia del intemperismo en la pedogénesis. El factor biótico se puede medir en términos de intemperismo biológico, definiendo la importancia de las plantas en la alteración pedológica o en función de la producción de ácidos húmicos. El relieve como factor formador es importante como controlador del drenaje y el flujo de humedad, asociados con la pendiente, tal que esta última puede usarse para obtener un valor específico. El material parental se puede evaluar de acuerdo con su susceptibilidad a la alteración mineralógica. De esta forma, con los valores obtenidos, se puede construir una matriz de correlación donde se señalen las interrelaciones entre cada factor.

Otra opción se refiere al uso de balances geoquímicos donde se definen las tasas de alteración y formación de suelo de acuerdo a la ecuación establecida por Wakatsuki y Rasydin (1992):

$$S1 + G = S2 + W, \text{ donde}$$

S1 es la composición de la roca sujeta a alteración
W es la cantidad de soluto en gramos por litro de solución
G es la cantidad de roca parental necesaria y de entradas atmosféricas para producir el soluto en un litro de agua
S2 son los gramos de suelo que, como consecuencia, son formados. En esta ecuación no se considera al factor erosivo, que también limita el desarrollo del suelo y, por lo tanto, debe ser cuantificado.

La composición de la solución del suelo puede considerarse como un índice de estabilidad mineral ya que los cambios mineralógicos son relativamente invariables con respecto al tiempo, en comparación con las reacciones de intercambio catiónico. Entonces, el proceso de desarrollo pedológico puede ser descrito en términos de un estado parcialmente estático o en equilibrio entre un sólido estacionario (minerales) y una solución móvil. Cada etapa de la pedogénesis involucra una composición única mineral-solución directamente relacionada a la composición original del material parental, la cual puede ser caracterizada cuantitativamente según las propiedades de la fase sólido-solución

(Karathanasis, 1989). Con lo anterior, lo que se pretende es crear un modelo de equilibrio en sistemas abiertos, que se comporte de acuerdo con las condiciones reales y que proporcione mayores datos sobre la termodinámica mineral.

Tomando en cuenta que cada mineral posee una tasa específica de disolución, se puede estimar la tasa relativa de formación de suelo y las secuencias de alteración dominantes en cada grupo de suelo bajo diferentes regímenes de humedad (Karathanasis, 1989). Aunque se desconoce con certeza cuáles son las velocidades de solubilidad (pK) de todos los minerales, existen datos para ciertas asociaciones comos son: cuarzo-sílice amorfo, esmectita-caolinita, hidromicas y carbonatos (tabla 2.1).

Tabla 2.1. Valores de pK (velocidad de disolución) de diferentes minerales (fuente: Karathanasis, 1989).

Reacción de disolución	Valor de pK	Referencia
SiO_2 (amorfo)+$2H_2O=H_4SiO_4^\circ$	2.7	Lindsay, 1979
SiO_2 (cuarzo)+$2H_2O=H_4SiO_4^\circ$	4.0	Lindsay, 1979
$Al_2(OH)_3$ (gibsita) + $3H^+=Al^{3+}$ +$3H_2O$	-8.05±0.73	Sposito, 1985
$Al_2(OH)_3$ (amorfo) + $3H^+=Al^{3+}$ +$3H_2O$	-9.46	Lindsay, 1979
FeOOH (goetita) + $3H^+=Fe^{3+}$ +$2H_2O$	0.02	Lindsay, 1979
FeOOH (suelo) + $3H^+=Fe^{3+}$ +$2H_2O$	-2.70	Lindsay, 1979
$Al_2Si_2O_5(OH)_4$ (caolinita cristalina)+ $6H^+=2Al^{3+}$ + $2H_4SiO_4$+ H_2O	-7.12 ±0.6	Wagman et al., 1982
$Al_2Si_2O_5(OH)_4$ (caolinita en el suelo)+ $6H^+=2Al^{3+}$ + $2H_4SiO_4^\circ$ + H_2O	-8.7± 1.1	Karathanasis y Hajek, 1982
$Al_2Si_2O_5(OH)_4$ (haloisita)+ $6H^+=2Al^{3+}$ + $2H_4SiO_4^\circ$ + H_2O	-10.48±0.6	Wagman et al., 1982
$CaCO_3$ (calcita) + $2H^+= Ca^{2+}$ +CO_2 +H_2O	-9.8	Lindsay, 1979
$MgCa(CO_3)_2$ (dolomita) + $4H^+= Ca^{2+}$ + Mg^{2+} +$2CO_2$ +$2H_2O$	-18.46	Lindsay, 1979

Como se observa en la tabla 2.1, los valores más altos de pK corresponden al sílice cristalino ,que representa al mineral con la velocidad más baja velocidad de solución. Por otro lado, la dolomita representa al mineral con menor valor de pK y mayor portencial de disolución, siguiéndole la haloisita y la calcita.

De hecho se sabe que las tasas de los silicatos difieren enormemente de las de carbonatos. Dado que la disolución química de los silicatos es muy lenta, es esencial entender su aspecto cinético, para lograr predecir la influencia de ciertos factores en la tasa de intemperismo de los minerales (Wollast y Chou, 1984). Sin embargo, esta es una tarea difícil porque las reacciones de disolución y precipitación de los minerales son complejas y dependen de fenómenos de transporte y reacciones superficiales, tal que muchos de los ensayos hechos en

laboratorio poco aportan al entendimiento de los mecanismos fundamentales de los procesos involucrados (Wollast y Chou op cit.).

La tasa de disolución de sólidos (silicatos) en soluciones acuosas pueden estar controladas por reacciones químicas en la interfase sólido-agua o por transporte de reactantes y productos en el sistema de reacción. En este caso no entran las reacciones que suceden por difusión, que es el caso del NaCl, $CaCO_3$.

En la tasa de disolución de un mineral hay una fuerte relación con el pH y el espesor del mineral con respecto al tiempo. Las investigaciones se han centrado en la solubilidad del cuarzo y coinciden en afirmar que sigue un comportamiento parabólico (Petrovic, 1976 y Wollast y Chou, 1985). Sin embargo, se ha señalado, también, que este comportamiento no es completamente real, porque en las primeras etapas del intempersimo, existe un capa protectora que frena los procesos de disolución, haciéndolos muy lentos, de forma que el comportamiento es parabólico. En las etapas posteriores la reacción alcanza un estado de equilibrio y la disolución se vuelve congruente y con un comportamiento hiperbólico (Paces, 1973).

A pesar de la dependencia de la disolución con respecto al pH, no existen muchos trabajos que documenten las tasas de disolución de diferentes minerales. Sin embargo, sí se tienen datos con respecto al efecto del H^+, bajo condiciones ácidas (tabla 2.2).

Tabla 2.2. Orden de dependencia sobre a_{H+} de la tasa de disolución sobre varios minerales (silicatos y óxidos) en soluciones ácidas reportadas en la literatura (en Wollast y Chou, 1988).

Mineral	Orden de reacción	Fuente
Feldespato potásico	0.33	Wollast (1967)
Albita	0.49	Wollast y Chou (1985)
Anortita	0.46	Fleer (1982)
Feldespato	1.00	Fleer (1982)
Diópsido	0.70	Schott et al. (1981)
Enstatita	0.80	Schott et al. (1981)
Broncita	0.50	Grandstaff (1977)
Óxido de hierro	0.48	Sigg y Stumm (1981)
Óxido de aluminio	0.40	Furrer y Stum (1983)

Como se observa, la evaluación de la velocidad de alteración de minerales asociada a la formación de suelo es una labor complicada y que se encuentra en una fase completamente experimental. No obstante, continúa planteándose como

una cuestión que debe ser resuelta, ya que aportaría datos muy valiosos sobre las condiciones de estabilidad ambiental en épocas presentes y pasadas.

Resulta, entonces, imprescindible el desarrollo de un modelo matemático que involucre aspectos distintivos del suelo como son sus propiedades físicas, químicas, morfológicas y mineralógicas, en términos de fácil comprensión y aplicación. Puede considerarse que un modelo completo es aquél que involucra aspectos cualitativos del sistema y que describa en términos cuantitativos los principales flujos de masa y energía (Oleschko, 1995).

Finalmente, al estudiar las tendencias evolutivas de dichas propiedades, es posible usar a los suelos como estimadores de la edad de los depósitos (Birkeland et al., 1991). Si bien estos indicadores arrojan errores muy altos, de hasta ±70% (Harden, 1987), para ciertos estudios, las estimaciones son muy valiosas y no más sesgadas que aquéllas proporcionadas por otras técnicas (Birkeland et al., 1991).

III. DISEÑO METODOLÓGICO

Para la construcción del modelo de evolución de los Andisoles, se ha considerado emplear tanto las propiedades diagnósticas de estos suelos, las cuales están directamente asociadas con los procesos pedogéneticos, como índices que evalúan a los factores formadores de suelo (relieve, material parental, clima, organismos). Asimismo, los parámetros involucrados se han analizado estadísticamente para darle mayor validez a los resultados.

En este capítulo se especifican las propiedades diagnósticas que se consideran las más adecuadas para explicar la génesis de los Andisoles; los índices que evalúan el comportamiento del clima, relieve, material parental y organismos, a los cuales se les ha designado como índices universales porque pueden ser aplicados a cualquier grupo de suelos; y el procedimiento seguido para la obtención del modelo.

3.1 Propiedades diagnósticas de los Andisoles.

3.1.1 Morfología

a. Horizontes. Entre las principales características de estos suelos se destaca la presencia de epipedones oscuros con un espesor promedio de 30 cm con un contenido de materia orgánica del 8%; alta porosidad; textura migajosa; consistencia friable, generalmente no adhesiva; y un marcado efecto de tixotropismo. Los epipedones pueden ser de varios tipos: hísticos, mólicos, ócricos, melánicos, fúlvicos o úmbricos. Comúnmente presentan perfiles AC, A(B)C, ABwC, Ah/AB/B/BC/C, o bien, perfiles complejos formados por la superposición de varios suelos constituidos bajo diferentes eventos (Fig. 3.1).

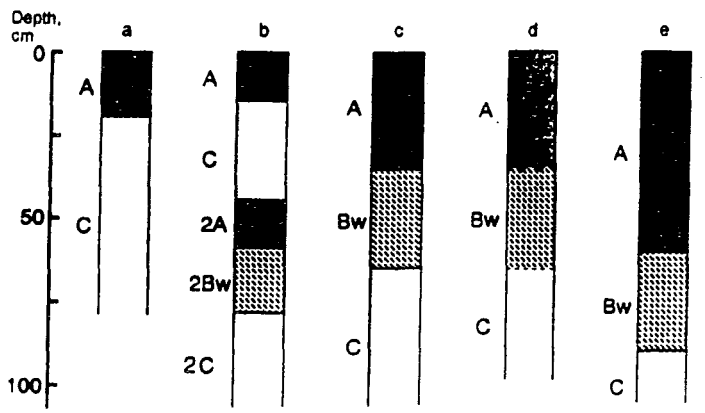


Fig. 3.1 Representación esquemática de algunos perfiles de Andisoles seleccionados (tomado de Shoji et al., 1993a).

b. Estructura. En el horizonte A es común encontrar una estructura de migajón o granular y, ocasionalmente, en bloques subangulares. El tamaño y tipo de esta estructura refleja el tipo de material del suelo, el grado de cultivo y el clima. Por lo que respecta a los horizontes subsuperficiales, la estructura es en forma de bloques subangulares. Sin embargo, los Andisoles muy jóvenes, derivados de cenizas de textura gruesa, frecuentemente carecen de estructura.

c. Color del suelo. El color de los Andisoles está determinado por el tipo de tefra, por el tipo y cantidad de materia orgánica y por la composición de los productos de intemperismo. Las tefras de composición ácida-intermedia dan origen a suelos de color blanco a gris, mientras que las de composición intermedia-básica proporcionan colores oscuros, negros a pardo rojizos. Los horizontes no humíferos en suelos bien drenados son de color amarillo a rojo, dependiedo del tipo de minerales de hierro que contengan. Los suelos tropicales, comúnmente muestran colores rojizos por la presencia de hematita. Por otra parte, el tipo de humus también proporciona ciertas coloraciones características. Si en el humus dominan los ácidos fúlvicos, las tonalidades son pardas oscuras, mientras que si se tienen ácidos húmicos, los horizontes tienden a tomar tonalidades muy oscuras (Shoji et al., 1993a).

d. Textura. La textura de los Andisoles está muy relacionada con el tipo de tamaño de partículas del material original, así como con el grado de intemperismo. Sin embargo, la medición de esta propiedad se torna complicada por el grado de agregación que alcanzan los constituyentes, resultando difícil lograr una dispersión adecuada. Para evaluar la textura de los Andisoles es necesario emplear fuertes dispersantes así como técnicas de ultrasonido, para lograr romper los agregados. Asimismo, Ito et al. (1991, en Shoji et al., 1993a) han observado la fuerte correlación que existe entre el contenido de arcilla y la retención de agua a 1500 kPa y el humus, haciendo una estimación más certera a través de estos dos parámetros.

e. Consistencia. El contenido de minerales no cristalinos en los Andisoles influye fuertemente en la consistencia en húmedo que muestran estos suelos, la que, a su vez, contribuye en el desarrollo de excelentes propiedades físicas para el cultivo y el crecimiento de las plantas. Además, esta consistencia está marcadamente afectada por el contenido de agua, proporcionando plasticidad y adhesividad, y el efecto de tixotropismo, muy caracterísitico de los Andisoles.

f. Desarrollo Relativo del Perfil (DRP), obtenido con el análisis de Bilzi y Ciolkosz (1977), el cual determina los cambios en características físicas y morfológicas en comparación con el horizonte de menor cambio (C). La evolución de las Andisoles se considera que es muy rápida, cuando se están

formando los horizontes A, ya que la acumulación de materia orgánica es alta, dirigiendo el proceso de andosolización. Así, los valores de DRP en las primeras etapas parecen ser más acentuados, alcanzando una cierta estabilización hacia las etapas finales, en las que podría considerarse se llega a un equilibrio con las condiciones ambientales (Birkeland, 1984a).

3.1.2 Características físicas.

a. Densidad aparente. Estos suelos se caracterizan por presentar una baja densidad aparente (<0.85 g/cm^3 medida a 33 kPa) en la fracción arcilla. Este valor es debido a los altos contenidos de materia orgánica, a la baja densidad de partícula del vidrio volcánico, al tipo de estructura y a la porosidad que poseen.

b. Retención de agua a 1500 kPa. Los Andisoles tienen la capacidad de retener altas cantidades de agua, la cual se considera no es retenida en la superficie de las arcillas, sino en pequeños espacios vacíos que dejan los minerales al intemperizarse (Warketin y Maeda, 1980). Así, el contenido de agua presente es una función directa del contenido de alofano. En las etapas tempranas de alteración de cenizas volcánicas, los suelos presentan valores bajos de retención de humedad, ya que la alteración de minerales primarios es incipiente. Sin embargo, en las etapas posteriores, cuando hay una mayor formación de minerales alofánicos y se ha aumentado la superfiicie específica, la retención de agua aumenta considerablemente. Cuando estos suelos son secados al punto de marchitez permanente (1500 kPa), adquieren un desecamiento irreversible, que cambia gran parte de sus propiedades diagnósticas, ya que el alofano cristaliza a minerales haloisíticos. Así, el contenido de agua a 1500 kPa, se considera una prueba importante para determinar el comportamiento de estos suelos.

3.1.3 Características químicas.

Los Andisoles son suelos que presentan una alta variabilidad en su composición química debido, principalmente a: la composición original del material volcánico parental; los regímenes climáticos que controlan la velocidad de intemperismo, lixiviación, lavado y drenaje; y a la acumulación de materia orgánica (Van Wanbeke, 1991). Sin embargo, existen algunos parámetros que ayudan a diagnosticarlos de una manera más o menos clara, entre los que destacan:

a. Cargas superficiales. La ausencia de minerales bien cristalizados en la fracción arcilla marcan a los Andisoles como auténticos suelos de carga variable. En estos suelos, las cargas de los coloides son altamente dependientes del pH y de la concentración de la solución donde éste se mide. Así, al medir el pH a diferentes concentraciones, se puede evaluar la

existencia de cargas variables en el suelo, las cuales al ser dependientes de sus constituyentes mineralógicos, reflejan el desarrollo del suelo.

b. pH delta. Estima la proporción de cargas positivas y negativas en las cargas variables de los coloides. La evaluación se realiza a través de la medición del pH en KCl menos el pH medido en agua. Los valores por encima de -0.5 son indicativos de minerales de carga variable, es decir de etapas poco desarrolladas; mientras que los valores arriba de 0 o +0.1 son típicos de suelos con pocos cationes en solución, es decir que han perdido una buena cantidad de bases (Van Wambeke, 1991).

c. Punto isoeléctrico (pHo). El pHo de las arcillas amorfas varía con la relación SiO_2/Al_2O_3. El valor de pHo cambia gradualmente a valores más altos, a medida que la proporción relativa de aluminio se incrementa por efecto de la desilicatación. El signo (+-) de la carga que desarrollan los coloides del suelo depende del valor del pH del suelo con respecto al punto isoeléctrico: pH suelo-pHo. El uso del valor del pHo asume que sólo un tipo de coloides (alofano-humus) está presente en el suelo.

d. Retención de fosfatos (Pret). Los Andisoles son suelos que tienden a fijar grandes cantidades de fósforo (Pret>85%), las cuales varían con la relación SiO_2/Al_2O_3 de los coloides del suelo. En materiales ricos en SiO_2 la densidad de enlace en los hidróxilos-aluminio es pobre, por lo que es baja la retención de fosfatos. Consecuentemente, los Andisoles van adquiriendo una mayor retención a medida que maduran y evolucionan, y que el aluminio se incrementa, aunque en las etapas finales de desarrollo, esta relación vuelve a ser baja.

e. Índice isoeléctrico de intemperismo. Los Andisoles muy desarrollados muestran aluminosilicatos amorfos caracterizados por una relación molar SiO_2/R_2O_3 (sílice/sesquióxidos) baja, un punto isoeléctrico alto y un valor del pH cercano al pHo. La secuencia de evolución termina en un suelo que, prácticamente, no tiene cargas, con contenidos bajos en cationes y pH neutros o ácidos.

f. Capacidad de intercambio catiónico (CIC). Esta propiedad de los Andisoles se encuentra íntimamente relacionada con su composición mineralógica. Así, la CIC del alofano es muy alta, aunque variable, oscilando entre 20 y 100 cmol/Kg de suelo. Esta gran fluctuación es el resultado de que la retención de bases no sólo se debe a la atracción electrostática sino a que los iones en solución son adsorbidos en el interior de las partículas por mecanismos de difusión iónica (Ford, 1984). Asimismo, la CIC depende fuertemente del pH, sobre todo en suelos con complejos humus-Al, humus-Ca y haloisita (Wada, 1985).

g. pH (NaF). Este valor es mayor que 9 en Andisoles y refleja el contenido de aluminio activo en el suelo, de tal forma que los valores altos implican una mayor evolución en el perfil.

3.1.4 Mineralogía

Las fracciones coloidales de los Andisoles están constituidas, principalmente, por minerales no cristalinos y arcillas cristalinas en cantidades escasas. Entre los amorfos se incluyen los complejos de aluminio, sílice-aluminio, hierro y humus.

Los minerales más comunes que presentan son:

a. Arcillas amorfas:

Alofano. Es un aluminosilicato hidratado en el que predominan las uniones Si-O-Al. Su estructura molecular es similar a la de un filosilicato 1:1 que contiene aluminio en posiciones octahédrica y tetrahédrica, presentándose en esférulas "huecas" de 3.5 a 5 μm de diámetro. Su relación molar de SiO_2/Al_2O_3 es de 1 a 2 y su superficie específica varía de 700 a 1200 m^2/g (Wada, 1985).

La formación de alofano a partir del vidrio volcánico se lleva a cabo de la siguiente manera (Swindale, 1965):
1. Hidratación del vidrio volcánico
2. Pérdida de bases y sílice por lavado
3. Fragmentación de las partículas de vidrio en trozos cada vez menores, a consecuencia de las tensiones internas generadas por la hidratación y la pérdida de bases, quedando el alofano formado, integrado en la fracción arcilla.

Constituyentes proto-alofánicos. Estos materiales coexisten con el alofano o pueden ser una parte de él. Poseen una relación molar más baja que la del alofano y una reactividad más alta del aluminio.

Imogolita. Se presenta como elementos filamentosos de 10 a 33 μm de diámetro. Su fórmula aproximada es:

$$1.1\ SiO_2.\ Al_2O_3.\ 2.3\text{-}2.8\ H_2O\ (+)$$

con una superficie específica de 900 a 1000 m^2/g (Wada, 1985).

Ferrhidrita. Mineral amorfo o paracristalino de hierro, precursor de la hematita, que se produce por la alteración de los ferromagnesianos presentes en los materiales volcanicos. Su fórmula aproximada es:

$$Fe_5(O_4H_3)_3$$

Complejos de aluminio-hierro-humus. Constituídos por ferrihidrita e hidróxidos de aluminio, formados por la liberación del hierro y aluminio de los minerales primarios durante el intemperismo y estabilizados por los compuestos húmicos de la materia orgánica.

Ópalo y fitolitos. Se presentan como amorfos en la fracción de limo principalmente, sobre todo en los Andisoles jóvenes (< 500 años de edad), cuando la formación de alofano e imogolita es inhibida y la de humus activada (Wada, 1980)

b. Arcillas cristalinas.

Haloisita puede presentarse en formas hidratada y deshidratada y es el primer filosilicato que aparece en los perfiles que adquieren madurez tipogenética y es común en climas subtropicales cercanos a los templados o templados cercanos a los tripocales (García, 1997).

Gibsita es una de los constituyentes arcillosos más frecuente en los Andisoles de climas húmedos y perhúmedos (Van Wambeke, 1991). Su formación se debe a la desaluminización que sufre el alofano en las etapas finales del intemperismo, al ser sustituído por haloisita, tal que el contenido de gibsita se incrementa por la abundancia de alúmina liberada en el proceso (Besoain, 1985).

Cuando las condiciones en el suelo son de continua humedad, se considera que los contenidos de amorfos son sumamente estables, ya que tienen una gran afinidad con el humus, de modo que forman complejos de gran estabilidad. Sin embargo, el desecamiento del suelo origina que estos minerales cristalicen irreversiblemente a arcillas, de tal modo que se puede construir una secuencia mineralógica con los diferentes intergrados:

amorfos-> amorfos-arcillas-> arcillas-amorfos ->arcillas.

3.2 Índices empleados para evaluar a los factores formadores de suelo

Los factores formadores del suelo tienen un carácter cualitativo, por lo que en algunos de los modelos generados para explicar la génesis del suelo, se intenta darles un valor que permita su evaluación (Jenny, 1941; Johnson et al. 1990; Phillips, 1989 y 1993b). En este trabajo se han tomado diversos índices para caracterizar a cada uno de los factores formadores, que si bien no explican al cien por ciento su influencia sobre el suelo, sí permite contar con valores que pueden ser manejados y ayudan a definir su génesis, proporcionándoles un carácter cuantitativo.

3.2.1 Relacionados al clima

a. Excedente estacional de lluvia Ln (Papadakis, 1980), el cual se refiere a que debe haber una mayor cantidad de lluvia que de evapotranspiración, para que el agua pueda penetrar a una cierta profundidad. Para el caso particular de este trabajo, se relaciona con procesos de lavado y de iluviación de materiales.

Fórmula: Ln= Ph-Eh+Pa/10
donde Ph es la suma de la precipitación durante la estación húmeda
Eh es la suma de la evapotranspiración durante la estación húmeda
Pa es la precipitación anual (se toma el 10% del total de lluvia en el año)

b. Indice de alteración mineral Alml (Papadakis, 1980), relacionado con la profundidad a la que el agua penetra en los materiales y a la temperatura ambiental que puede acelerar o detener los procesos de alteración.

Fórmula: Ialml= $TLn/10^2$
donde T es la temperatura máxima media anual

c. Indice de crecimiento vegetal ICV (Papadakis, 1980), que señala la influencia del clima sobre el crecimiento de las plantas.

Fórmula:
$ICV= 1/((1/10)^{0.1T}+10^{0.1t}/10^5+0.5/10^{0.5HA}+1/10^2)(12/d)^{0.75})$
donde T es la temperatura máxima media anual
t es la temperatura mínima media anual
HA es el índice hídrico, relacionado al agua almacenada en el suelo más la precipitación mensual, dividido entre la evapotranspiración.
d es la duración del día en horas

d. Indice de agresividad climática Agcl (FAO, 1980) el cual se refiere a la influencia del clima sobre los procesos de degradación física de los materiales.

Fórmula: $IAgcl= \Sigma(pm^2/P)$
donde pm es la precipitación mensual y
P es la precipitación anual

e. Drenaje climático general (Duchaufour, 1984).

Fórmula: Drcl= ΣDm - 100 mm
Dm=P - EPT, tomando sólo los meses en los que P>EPT.
donde Dm es el drenaje mensual, P la precipitación mensual y EPT la evapotranspiración mensual.
100 mm son la estimación aproximada de la recuperación de las reservas de agua del suelo al principio de la estación lluviosa,

f. Drenaje climático local. Es un elemento clave para evaluar los procesos de arrastre.

Fórmula Drclm: Drcl/pendiente del terreno

3.2.2 Relacionados con la vegetación

a. Indice de descomposición de la materia orgánica IDMO, (FAO, 1980) bajo condiciones údico-ústicas, se considera que aumenta la degradación en 1.5 puntos, por cada variación de 5°C en la temperatura ambiental.

b. Indice de cobertura vegetal Cove(FAO, 1980). Este índice de emplea para dar un valor específico en relación al porcentaje de cubrimiento del suelo por un cierto tipo de vegetación.

Fórmula: Se mide en cartas o fotografías aéreas la densidad de cobertura vegetal y se asignan valores paramétricos, de acuerdo a la tabla 3.1

Tabla 3.1 Valores paramétricos asignados al porcentaje de cubrimiento y tipo de vegetación (FAO, 1980).

	Porcentaje de cubrimiento del suelo					
Vegetación	**0-1**	**1-20**	**20-40**	**40-60**	**60-80**	**80-100**
Praderas, pastos y pastizales	0.45	0.32	0.20	0.12	0.07	0.020
Bosque con sotobosque apreciable	0.45	0.32	0.16	0.18	0.01	0.006
Bosque sin sotobosque apreciable	0.32	0.32	0.20	0.10	0.06	0.010
Estepa (sin árboles)	1.00	0.70	0.50	0.30	0.15	0.050
Sabana con árboles	1.00	0.70	0.40	0.25	0.10	0.030
Bosque sabanero	1.00	0.60	0.30	0.20	0.10	0.010
Monte alto	0.90	0.50	0.30	0.15	0.05	0.001

c. Degradación biológica IDB (FAO, 1980)

Fórmula: $IDB= 1/12 \Sigma e^{0.1065t} P/EP$

donde t es la temperatura media mensual

P es la precipitación y EP es la evapotranspiración

Nota: Si P>EP, P/EP=1 y si t<o, t=0

3.2.3 Relacionados con el material parental y el suelo.

a. Indice de lixiviación (Colman, 1980) importante para determinar las modificaciones que ha sufrido el suelo en comparación con el material parental.

Fórmula: Lx=

$[(K_2O/PM+Na_2O/PM)/SiO_2/PM]/[(K_2O/PM+Na_2O/PM)/SiO_2/PM]$

suelo material parental

donde los porcentajes de óxidos se obtienen a través de los análisis de óxidos totales y PM es el peso molecular de cada compuesto.

b. Indice de erodabilidad de los materiales, factor K (FAO, 1980) que nos indica la susceptibilidad de los materiales a la erosión, directamente relacionado, entonces, a su capacidad para permanecer o no *in situ* y formar suelo.

Fórmula: Se emplea un nomograma en el que se encuentran graficados: los porcentajes de arena muy fina+limo, arena y materia orgánica, el tipo de estructura y la permeabilidad.

c. Balances geoquímicos (Krauskopf, 1979) que también hace comparaciones entre el material parental y el suelo, a través del cálculo de pérdidas y ganancias relativas que ha habido en el perfil, tomando como base un elemento estable, que en este caso es el aluminio.

Procedimiento:

Se recalcula la suma de óxidos totales al 100%

Se divide el porcentaje de Al_2O_3 original entre el de Al_2O_3 del suelo

El radio obtenido se multiplica por el porcentaje de óxidos del suelo

Las pérdidas y ganancias se obtienen al restar el valor original del calculado en el punto anterior

El resultado se puede expresar en porciento, dividiendo los valores anteriores entre los originales.

d. Indice de intemperismo de Parker (Colman, 1980). Este valor va disminuyendo a medida que se van perdiendo las bases del perfil. Por lo mismo, los valores altos reflejan etapas iniciales de desarrollo, mientras que los valores bajos implican que la mayor parte de los cationes se han perdido y ha actuado un intemperismo intenso en los suelos

Fórmula:

$IP= K_2O/PM/0.25+Na_2O/PM/0.35+CaO/PM/0.7+MgO/PM/0.9$

e. Relación sílice/aluminio En Andisoles la relación disminuye al progresar el intemperismo, permitiendo que el aluminio activo controle algunas de sus propiedades agronómicas, como son la retención de fosfatos y la acumulación de materia orgánica (Van Wambeke, 1991).

Fórmula: $Sa= SiO_2/PM/Al_2O_3/PM$

f. Relación $Fe_2O_3/(Fe_2O_3+SiO_2)$. Esta relación depende del contenido de minerales amorfos y marca la diferencia entre los amorfos silicatados y los amorfos de hierro. El valor es pequeño cuando se trata de suelos jóvenes poco desarrollados con grandes cantidades de alofano (cercana a cero), mientras que un valor de 0.4 implica que se tiene un 40% de amorfos de hierro (Yong et al., 1992).

Fórmula:

$Fes= Fe_2O_3/(Fe_2O_3+SiO_2)$

g. Relación sílice/sesquióxidos. En Andisoles esta relación es alta en las etapas iniciales del intemperismo y muy baja cuando se llega a etapas finales de desarrollo, ya que el suelo ha perdido gran parte de sus cargas, tiene bajos contenidos en cationes y valores de pH neutro o ácidos.

Fórmula: $Ses= SiO_2/PM/(Al_2O_3/PM+ Fe_2O_3/PM+ TiO_2/PM)$

3.2.4 Relacionados con el relieve

a. Pendiente (FAO, 1980)

Fórmula: $P= h/l \times 100$

donde h es la altura medida en una carta topográfica y l la distancia entre las cotas consideradas, quedando la medida expresada en porciento

b. Profundidad del suelo (horizonte A, epipedón y horizonte B) que indica las modificaciones que sufre el perfil (con horizontalización) y la persistencia de ciertos procesos.

c. Profundidad del horizonte Cw que puede ser indicativo de la profundidad a la que son activos los procesos de alteración por drenaje vertical.

3.3 Métodos empleados para el muestreo y análisis de laboratorio de cada perfil.

Para elaborar el modelo que se presenta en esta investigación se hizo la selección de 15 perfiles edáficos, que fueron muestreados y analizados empleando técnicas similares. Esto es recomendable, porque así se disminuyen los errores derivados de comparar técnicas inadecuadas o diferentes. La metodología empleada para obtener las muestras, las propiedades físicas, químicas y morfológicas, así como los índices relacionados con los factores formadores es la siguiente:

3.3.1 Muestreo de suelos

Descripción de acuerdo a la metodología ASTM-USDA (1986).
Clasificación de acuerdo con Soil Survey Staff (1994) y FAO-UNESCO - ISRIC (1994)

3.3.2 Análisis de laboratorio

a. Análisis físicos

Color en húmedo (0.33 bar) y color en seco (15 bars) determinado a través de las tablas Munsell (1990)

Textura con el método de Bouyoucos (1955), después de un tratamiento con NaOH y el uso de ultrasonido para la dispersión de partículas.
Densidad aparente, por el método de Blake (Blake y Hartge, 1982)
Retención de agua con extracción de presión de membrana a 1500 kPa (SCS-USDA, 1986).

b. Análisis químicos

Capacidad de intercambio catiónico con el método de NH_4OAc, pH 7 (SCS-USDA, 1986)
Bases intercambiables con extracción NH_4OAc, pH 7 (SCS-USDA, 1986)
pH en agua con el método de Fields y Parot (1966) modificado por(SCS-USDA, 1986)
pH en KCl agua con el método de Fields y Parot (1966) modificado por (SCS-USDA, 1986)
pH en NaF agua con el método de Fields y Parot (1966) modificado por (SCS-USDA, 1986)
Materia orgánica determinada con el método de Walkley y Black (1947)
Carbono orgánico con el método de Walkley y Black (1976)
Nitrógeno total determinado por el método Kjeldahl (SCS-USDA, 1986).
Retención de fosfatos por el método propuesto por Blakemore et al. (1981).
Valor delta con las técnicas de Aomine y Jackson (1959)
Öxidos totales a través del análisis de fusión (Shapiro y Brannock, 1956)

3.3.3. Análisis de los factores formadores

a. Clima. El análisis de este factor comprende la determinación del edafoclima y el balance de agua en el suelo por medio de los datos de temperatura y precipitación procedentes de las estaciones climatológicas adyacentes al área, de acuerdo con la metodología de Thornwaite (1948).

b. Material parental. En muy pocas ocasiones se puede reconocer el material parental de un suelo como tal, así que el estudio de este factor se basa en el análisis de la litología presente en el área por medio del muestreo de las rocas, el análisis petrográfico y análisis químico de los materiales.

c. Relieve. Se basa en el análisis morfométrico y morfogenético (Lugo, 1988). que involucra la determinación del drenaje, pendientes y la delimitación de las unidades del paisaje.

d. Vegetación. Este aspecto se analiza de acuerdo con la interpretación de fotografías aéreas, imágenes y trabajo de campo, para determinar tipo y cobertura vegetal. Asimismo, se cuantifican los índices asociados a la vegetación (humificación, degradación biológica, etc.).

e. Cálculo de índices relativos a los factores formadores
Determinación de índices con las fórmulas enunciadas en el punto 3.2
Balance geoquímico

3.4 El modelo

El modelo que se propone en esta investigación es un modelo lineal de regresión múltiple, en donde se tiene una variable de respuesta Y y una serie de variables independientes X_n, representado por la ecuación:

$$Y=\beta_0+\beta_1X_1+...+\beta_nX_n,$$

donde β_0, $\beta_1,...,\beta_n$ son parámetros desconocidos, $X_1,...X_n$ son constantes conocidas, supuestamente medidas sin error en un experimento y Y es la variable de respuesta aleatoria. Desde el el punto de vista práctico, se dice que Y es función de las variables independientes, las cuales producen un efecto neto en el comportamiento de Y, el cual puede ser evaluado con el modelo o bien pronosticado.

El método utilizado para obtener el modelo lineal de regresión multiple es el de los mínimos cuadrados, a través del cual se obtienen los parámetros β_0, $\beta_1,...,\beta_n$. Este método no es otra cosa más que el ajustar una línea recta a un conjunto de puntos que representan los datos. Al realizar este ajuste se pretende que los puntos que se desvían de la recta sean los menos, y que las desviaciones sean mínimas.

Cada valor estimado en el análisis posee un error, el cual tiende a ser pequeño cuando el número de datos es grande. Sin embargo, en muchas ocasiones, contar con una población de tamaño considerable no es posible por el alto costo que representa. Esto es particularmente válido en el campo de las Ciencias de la Tierra, en donde cada dato que se obtiene representa una inversión considerable, por lo que es indispensable contar con un buen estimador de bajo costo (Royle, 1979). Precisamente para obtener un buen estimador lineal, es necesario asignarle pesos a cada variable involucrada y determinar su grado de participación en el modelo (Hawkins y Cressie, 1984).

A pesar de que ciertas propiedades estudiadas poseen un comportamiento no lineal, se ha considerado trabajar con un modelo lineal debido a:

a. Que en las etapas iniciales e intermedias, hasta llegar a la madurez, la tendencia que llevan dichas propiedades a lo largo del tiempo, son prácticamente lineales.
b. Como se ha mencionado, en los Andisoles, los procesos que tienen que ver con la dinámica de la materia orgánica son muy importantes, los cuales son de

corta duración (Duchaufour, 1984), llevando un marcada tendencia lineal hasta que alcanzan su punto de equilibrio (Birkeland, 1984).
c. Cuando la tendencia lineal cambia, los Andisoles se encuentran ya en el límite hacia otros órdenes de suelos.

Así, para probar la eficacia del modelo que se propone, se ha trabajado en la correlación de los parámetros analizados para determinar la importancia de cada uno de ellos, de tal modo que se utilicen sólo los que resulten más representativos, es decir que cuenten con un coeficiente de correlación (R^2) mayor que el 75%.

3.4.1 Procedimiento para la obtención del modelo

Los pasos que se han seguido para la obtención de la ecuación de regresión lineal múltiple son los siguientes:

1. Se eligieron 15 perfiles de Andisoles de diferentes lugares de México, los cuales se han analizado siguiendo los mismos criterios para el muestreo y trabajo de laboratorio. La selección de los perfiles se hizo de tal forma que se tomaran en cuenta diferentes condiciones de clima (templado, subtropical y tropical) y material parental (cenizas volcánicas ácidas y básicas).

2. Se calcularon todos los índices que se emplearon en el modelo: índices relacionados con los factores formadores (climáticos, biológicos, del material parental), balances geoquímicos, relaciones moleculares con los óxidos totales, desarrollo relativo del perfil, con las fórmulas y procedimientos que se han señalado anteriormente.

3. Se realizó un análisis de regresión lineal para determinar el grado de correlación que cada propiedad tiene entre sí y evaluar su grado de dependencia. De este modo se pudieron seleccionar aquellos valores que resultaron más significativos. En esta primera fase las variables se relacionaron por separado: las propiedades físicas, las químicas, los índices resultantes del análisis de óxidos totales y del balance geoquímico.

4. Posteriormente se hizo un análisis de regresión múltiple por cada perfil y de acuerdo a sus propiedades, obteniéndose la ecuación de regresión que caracteriza a cada perfil.

5. Se hicieron gráficas de cada propiedad para observar su comportamiento por perfil y horizonte. Se recalcularon los valores de las propiedades involucradas, de tal manera que se le asigne a cada una un peso que facilite el manejo de los datos, a través de los siguientes pasos:

a. Se multiplicó el valor de la propiedad (DRP, densidad aparente, CIC, etc) por el espesor de cada horizonte.
b. Se sumaron los valores anteriores y se dividieron entre el espesor total, de tal forma que se calculó la media aritmética o promedio ponderado.
c. Se realizaron gráficas por cada propiedad contra perfil, para determinar su comportamiento y correlacionario con diferentes etapas de desarrollo.

6. Se determinó la secuencia evolutiva que, teóricamente, seguían los perfiles estudiados. Se realizó una regresión lineal para determinar el grado de correlación que tiene cada característica con respecto a dicha secuencia.

7. Por medio de este análisis se seleccionaron las propiedades que resultaron más significativas y representativas para el modelo, eligiéndose las propiedades que se consideron independientes y que eran responsables del comportamiento de una propiedad de respuesta (Y). Con ellas se realizó la regresión múltiple que proporcionó la ecuación de regresión lineal, el coeficiente de correlación (R^2) y los errores asociados a cada variable.

8. Con la ecuación obtenida, se calculó el valor teórico de la variable dependiente y se colocaron en la misma gráfica dicho valor y el valor observado para cada perfil, determinando qué tanto se desvían uno del otro. Existen desviaciones pequeñas y otras mayores, las cuales se explican por el comportamiento local de los factores formadores.

9. Se determinó el intervalo de valores que representó a cada etapa de desarrollo, asignándoles un valor paramétrico del 1 al 4.

10. A los valores de los índices relacionados con factores formadores, también se les aignó un intervalo de valores, a los que se les dio, a su vez, un valor paramétrico del 1 al 4, de tal manera que resultó más sencillo el análisis y correlación de los datos.

11. Estos valores se incluyeron en una matriz y se realizaron gráficas que explicaron la génesis y comportamiento de cada perfil, comparando los resultados obtenidos con el modelo y los valores paramétricos asignados a los factores formadores.

IV. PERFILES Y FACTORES FORMADORES

4.1 Introducción

En este capítulo se hace la descripción de las propiedades físicas y químicas seleccionadas, así como de las características morfológicas de los perfiles, a partir de las cuales se ha obtenido el índice de desarrollo relativo (DRP) de acuerdo con la metodología de Bilzi y Ciolkosz (1977), el cual es manejado en diversas investigaciones como un índice efectivo para medir el desarrollo del suelo (Birkeland, 1967; Yaalon, 1971; Meixner y Singer, 1981; Birkeland, 1984; Birkleland et al., 1991; Retallack, 1988, 1993). Asimismo, se ha establecido un grado de desarrollo teórico, de acuerdo a los criterios establecidos por diversos autores, quienes ubican a los Andisoles en diferentes estados evolutivos según las propiedades físicas, químicas, morfológicas y mineraloógicas que presentan (Kanno 1961, Aomine y Wada 1962, Kittrick 1969, Parfitt 1972, Buol et al. 1981, Parfitt et al., 1983; Wada, 1985; Saigusa et al., 1989; Shoji et al., 1993). Dichos autores coinciden en afirmar que el proceso de andosolización se rige por tres principios básicos e independientes de la naturaleza petrográfica (basalto-andesita-dacita-riolita) y climática (con excepción del clima xérico) y son: (1) universalidad de la secuencia de meteorización; (2) continuidad de los procesos; (3) dominancia del alofano entre los primeros productos neoformados. Sin embargo, la diferencia radica en la velocidad con que ocurren los procesos, siendo más rápidos en las cenizas volcánicas básicas que en las lavas.

Si bien es cierto que una roca básica se altera 2.4 veces más rápido que una ácida (Tardy, 1969), existen tres factores que pueden modificar la velocidad de transformación y son:

a. Porcentaje de flujo, índice de reacción y composición química, que son factores que cambian con el tiempo, o que son mínimos en los primeros estadíos de formación de suelo y que dependen, en gran medida, del clima.
b. Diferencias, a través del tiempo, de la velocidad de erosión y
c. Cambios en porcentajes y biotipos de microorganismos y de compuestos orgánicos.

Según Hetier (1975), la génesis de los Andisoles consta de tres etapas principales:
1. Alteración geoquímica y diagenética., la cual ocurre antes de la colonización por la vegetación y de la incorporación de materia orgánica. Durante esta etapa, los materiales volcánicos parentales se caracterizan, generalmente, por sus altos contenidos de cationes y la presencia de minerales amorfos, producto de la hidratación de los vidrios volcánicos, con relaciones altas SiO_2/R_2O_3. Algunos de los geles formados durante esta etapa evolucionan por cristalización a arcillas.

2. Alteración bioclimática e incorporación de la materia orgánica. La incorporación de hidrosolubles procedentes de la hojarasca propicia procesos de acidólisis. La solución de los cationes Al y Fe se intensifica por lo que la relación catión/anión es muy elevada. Al parecer, los compuestos húmicos formados en esta etapa, mantienen a los geles minerales en estado amorfo, impidiendo la neoformación de arcillas cristalinas. En esta etapa, las bases y la sílice son eliminadas progresivamente en estado soluble, incrementándose la desilificación a medida que se incorpora más materia orgánica. Por otra parte, los amorfos ricos en alúmina ejercen un efecto físico sobre esta última, ya que al mantener una condición de humedad constante, aceleran su descomposición, pero estabilizan y protegen los compuestos humificados contra la degradación microbiana, propiciando su acumulación en el perfil.

3. Envejecimiento de los geles mixtos. Los geles orgánicos y minerales evolucionan a través del tiempo, a formas más específicas: los hidróxidos de aluminio se individualizan y los ácidos húmicos se encuentran sólo en estado adsorbido sobre la superficie de los geles y tienden a conservarse, una vez alcanzada la madurez, casi sin ningún cambio por mucho tiempo. En estas condiciones, la acción inhibidora de los compuestos húmicos sobre la cristalización de los geles tiende a desaparecer y vuelve a ser posible una neoformación de arcillas limitada. Estas arcillas, debido al empobrecimiento del medio de bases y sílice, son diferentes a las formadas en la primera etapa (haloisita, imogolita y montmorillonita) y consisten en caolinita y gibsita. Esta última puede presentarse en casi todos los Andisoles a excepción de los muy recientes. Generalmente en un medio tropical, suele formarse directamente a partir del alofano. En el caso de la caolinita, se considera que se forma también del alofano, pero previa formación de haloisita. En casos de déficit extremo de sílice, la ferralitización puede suceder a la andosolización.

4.2 Los perfiles empleados en el modelo

El número de muestras consideradas para la construcción del modelo fue de 15 perfiles de suelo correspondientes a diferentes zonas volcánicas de México, en donde se presentan condiciones climáticas diversas, pasando por la zona templada a la subtropical y tropical. Es importante que el modelo propuesto sea válido precisamente para las condiciones climáticas mexicanas, sobre todo para las zonas tropicales, ya que los modelos que existen se han probado principalmente en zonas templadas y frías. Los perfiles de suelo se derivan de materiales volcánicos de diferentes composiciones y edades, pero básicamente trece de ellos son de edad holocénica (<10,000 años), mientras que dos proceden de materiales de 95,000 años de edad.

Catorce de los perfiles se localizan en la Faja Volcánica Transmexicana, en los estados de Jalisco, Morelos, Puebla y Veracruz, mientras que el otro pertenece a las emanaciones del volcán Chichonal en el estado de Chiapas (Tabla 4.1; Fig. 4.1). Cada uno de ellos posee diferencias en cuanto a los factores formadores, lo cual deriva en una evolución distinta que los ubica en diferentes etapas de desarrollo.

Tabla 4.1. Localización de los 15 perfiles

Perfil	Latitud	Longitud	Altitud	Pend. (%)	Localización
Chis	17°21′	93°14′	700	7,5	Volcán Chichonal, Chis.
Tall[1]	20°44′	103°36,5′	1700	18,1	Sierra La Primavera, Jal.
Tal[1]	20°44′	103°36′	1600	12,5	Sierra La Primavera, Jal.
63[2]	19°44′	97°33′	2570	6,0	Tlatlauquitepec, Pue.
14	19°59.8′	97°18.3′	380	18,0	Las Margaritas, Pue
6[2]	19°46′	97°21′	2115	10,0	Teziutlán, Pue
Si3[3]	19°57′	97°16′	920	3,0	Hueytamalco, Pue.
110[2]	19°54′	97°29′	1540	15,0	Teziutlán, Pue.
Si1[3]	20°06′	97°20′	650	7,5	Hueytamalco, Pue.
Si2[3]	20°5.5′	97°20.3′	530	5,0	Hueytamalco, Pue.
15	20°2.5′	97°15.3′	380	10,0	Las Margaritas, Pue.
2[4]	19° 05′	99°13′	3020	5,2	Sierra Chichinautzin, Mor.
3[4]	19° 02′	99°16.5′	2660	15,0	Sierra Chichinautzin, Mor.
Jal	19°30.8′	96°56.7′	1999	5,0	Jalapa, Ver.
16	20°10′	97°25′	200	3,0	Las Margaritas, Pue.

1 Datos tomados de Gama et al.,1990;. 2 Datos tomados de Valera, 1993;
3 Datos tomados de Sánchez, 1980; 4 Datos tomados de Solleiro, 1992.

Estos perfiles fueron seleccionados de acuerdo a los siguientes criterios:

a. Que fueran derivados de materiales volcánicos, independientemente de su composición química y mineralógica.
b. Que todos los perfiles hubieran sido analizados con las mismas técnicas, de tal manera que existiera una homogeneidad en la metodología, si bien los errores humanos por efecto del análisis no pudieron ser evitados. Dentro de este criterio fue importante considerar que el análisis de textura se hubiera hecho con un tratamiento de NaOH y dos minutos de ultrasonido para la completa dispersión de las partículas y la destrucción de pseudolimos, de tal manera que la información fuese más real.
c. Que todos ellos contaran con los resultados de las propiedades e índices utilizados en este trabajo. Este criterio fue difícil de lograr ya que no todos los perfiles contaban con toda la información necesaria; por esta razón hubo necesidad, en algunos casos, de realizar análisis complementarios, aunque en otros no fue posible, por la falta de muestras y el alto costo que representaba efectuar el análisis (como el análisis de óxidos totales)

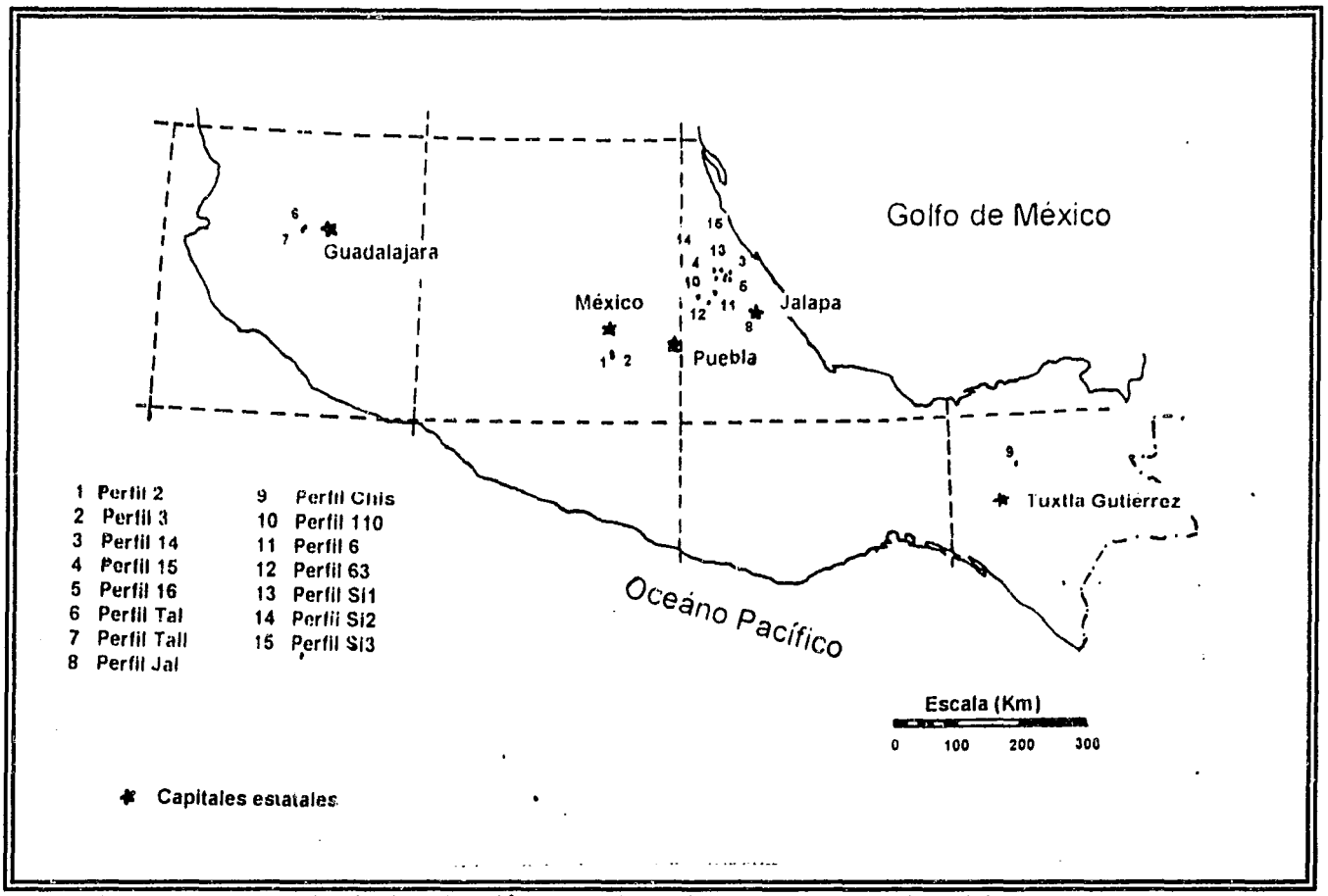


Fig. 4.1 Localización de los 14 suelos empleados en el modelo

d. Que, de alguna manera, se tuvieran datos sobre la edad de los depósitos de los cuales proceden.
e. Que comprendieran materiales diversos en origen, grado de consolidación y composición, destacándose que los perfiles proceden de materiales piroclásticos.
f. Que cada perfil representara una etapa diferente de desarrollo.

Dentro de los perfiles considerados, tres son Entisoles que constituyen el 20% de la muestra; cuatro son suelos con características vítricas, en diferentes estados de desarrollo, que representan el 26.7% del total; dos de los perfiles poseen características eútricas y dos, dístricas, constituyendo el 13.3% cada uno. Finalmente, se tienen cuatro Andisoles que representan los estadíos evolutivos intermedios (26.7%).

Cabe aclarar que a pesar de que casi todos estos perfiles poseen características ándicas, no todos cumplen con el criterio extricto de Andisoles, según Soil Taxonomy (1994).

4.2.1 Los perfiles

De los 14 perfiles, 5 fueron colectados por el autor de esta investigación, 2 son inéditos y proceden de los datos aportados por el Dr. Jorge Gama y el resto fueron tomados de diversos trabajos de suelos derivados de materiales volcánicos.

Perfil Chis (volcán Chichonal, Chis.)

Este es el perfil más joven de los que se analizaron, derivado de las emanaciones volcánicas del volcán Chinchonal, en el estado de Chiapas (tabla 4.1), colectado tres años después de su erupción. Dichas emanaciones corresponden con cenizas de naturaleza básica (tabla 4.2) (Cochemé y Demant, 1993; Silva, 1983). La vegetación que se presenta es pionera y el clima que caracteriza a la zona es cálido-húmedo y el edafoclima údico, isotérmico (tabla 4.3). La clasificación propuesta (tabla 4.4) corresponde con un Vitrandic Udorthent (Soil Taxonomy, 1990) o un Regosol vítrico (FAO-UNESCO, 1988).

Los análisis de laboratorio indican que, no obstante su juventud, los procesos de adición y acumulación se efectúan con rapidez. Los valores de S/T lo ubican como un material neutro, en tanto que los valores de pH en NaF y reacción a la fenoftaleína le confieren caracteres ándicos muy incipientes. Los valores de CIC, retención de fosfatos y retención de humedad son bastante bajos (anexo 1, tabla 1), al igual que el DRP (anexo 1, tabla 2, Fig. 4.2h).

Perfil Tall (La Primavera, Jal.)

Este perfil se encuentra en la Sierra La Primavera, en el estado de Jalisco, en donde afloran materiales volcánicos, principalmente tobas ácidas de 95,000 años de edad (Gama et al., 1990), bajo un bosque de encino-pino que cuenta con un sotobosque arbustivo y herbáceo (tabla 4.2). El clima de la zona es templado subhúmedo con un edafoclima de tipo ústico, hipertérmico (tabla 4.3). La clasificación propuesta (tabla 4.4) corresponde con un Typic Ustorthent (Soil Taxonomy, 1990) o un Regosol eútrico (FAO-UNESCO, 1988).

En este perfil, el contenido de elementos finos es escaso, observándose un ligero incremento en el porcentaje de arena y una disminución de limo con la profundidad, que son producto de una gradación mecánica de los elementos texturales. Las arcillas son muy escasas y no se muestra migración de estos elementos. La CIC es muy baja, así como la retención de agua a 1500 kPa y la retención de fosfatos) (3-5 cmol/Kg de suelo, 2.5-2.9% y < 5%, respectivamente). La saturación de bases es < 60% en los primeros 70 cm, que indica una lixiviación en esta porción del perfil (anexo 1, tabla 3). Los valores de DRP son bajos (28) (anexo 1, tabla 2). Es un suelo muy joven, poco alterado y diferenciado que presenta una evolución muy lenta (Fig. 4.2g).

Perfil Tal (La Primavera Jal.)

Este perfil se encuentra en la Sierra La Primavera, en el estado de Jalisco, en donde afloran materiales volcánicos, principalmente tobas ácidas de 95,000 años de edad (Gama et al., 1990), bajo un bosque de encino-pino que cuenta con un sotobosque arbustivo y herbáceo (tabla 4.2). El clima de la zona es templado subhúmedo con un edafoclima de tipo ústico, hipertérmico (tabla 4.3). La clasificación propuesta (tabla 4.4) corresponde con un Typic Eutrochrepts (Soil Taxonomy, 1990) o un Cambisol eútrico (FAO-UNESCO, 1988).

En este perfil, el contenido de elementos finos es escaso, no obstante, se observa un incremento en el porcentaje de arcillas en el horizonte B por efecto de lavado. La relación limo/arcilla es alta en A y moderada en B, tal que se evidencia una ligera transformación de minerales primarios en este último. La CIC es muy baja, así como la retención de agua a 1500 kPa y la retención de fosfatos) (6.1-6.4 cmol/Kg de suelo, 2.3-2.9% y < 5%, respectivamente). La saturación de bases es > 60% en todos los casos, presentándose el valor más alto en B, que indica una lixiviación en A y acumulación en B (anexo 1, tabla 4). Los valores de DRP son bajos (37.5) (anexo 1, tabla 2). Es un suelo muy joven, poco alterado y ligeramente diferenciado, a través de un horizonte A ócrico y un incipiente B cámbico (Fig. 4.2f).

Tabla 4.2. Vegetación y material parental de los perfiles analizados

Perfil	Localidad	Vegetación	Material parental	Edad MP años
Chis	Chiapas	Pastos ploneros	Cenizas básicas	3
Tall	La Primavera	Bosque de encino-pino, sotobosque arbustivo y herbáceo	Toba riolítica	95000[1]
Tal	La Primavera	Bosque de encino-pino, sotobosque arbustivo y herbáceo	Toba riolítica	95000[1]
63	Tlatlauquitepec	Agricultura de temporal, trigo.	Toba ácida	7000[2]
14	Las Margaritas	Pastizal inducido	Piroclastos ácidos	7500[2]
6	Teziutlán	Agricultura de temporal, maíz.	Brecha volcánica básica	5000[2]
Si3	Hueytamalco	Bosque caducifolio	Piroclastos ácidos	7500[2]
110	Teziutlán	Pastizal inducido. Bosque de pino-encino	Piroclastos básicos	5000[2]
Si1	Hueytamalco	Bosque caducifolio	Piroclastos ácidos	7500[2]
Si2	Hueytamalco	Bosque caducifolio	Piroclastos ácidos	7500[2]
15	Las Margaritas	Pastizal inducido	Piroclastos andesíticos	7000[2]
2	Chichinautzin	Bosque de pino, pastizal inducido.	Ceniza basáltica	8500[3]
3	Chichinautzin	Bosque de pino-encino, pastizal inducido	Ceniza basáltica	8500[3]
Jal	Jalapa	Bosque mesófilo de montaña	Piroclastos andesíticos	5500[2]
16	Las Margaritas	Pastizal inducido.	Ceniza volcánica andesítica	7000[2]

1 De acuerdo a Gama et al. (1990) 2 De acuerdo a Negendank et al., 1995
3 De acuerdo a los datos aportados por Solleiro (1992)

Tabla 4.3. Condiciones climáticas y edafoclima de los perfiles analizados

Perfil	TMA °C	PA cm	EPA cm	Clima	Fórmula climática	Edafoclima
Chis	22.5	424.3	108.1	Cálido húmedo	Af(m)	Údico, isotérmico
Tall	20.3	77.6	92.6	Templado subhúmedo	C(fm)	Ústico, hipertérmico
Tal	20.3	77.6	92.6	Templado subhúmedo	C(fm)	Ústico, hipertérmico
63	16.0	69.1	72.4	Templado subhúmedo	$C(w_1)(w)$	Ústico, isotérmico
14	22.9	352.1	121.6	Cálido subhúmedo	Aw_2	Údico, isotérmico
6	16.0	120.0	72.5	Templado subhúmedo	C(fm)	Údico, isotérmico
Si3	22.1	366.5	110.5	Semicálido subhúedo	(A)Cf(m)	Údico, isotérmico
110	21.3	380.9	99.5	Semicálido subhúmedo	(A)C(fm)	Údico, isotérmico
Si1	22.1	366.5	110.5	Semicálido subhúmedo	(A)Cf(m)	Údico, isotérmico
Si2	22.1	366.5	110.5	Semicálido subhúmedo	(A)Cf(m)	Údico, isotérmico
15	22.9	352.1	121.6	Cálido subhúmedo	Aw_2	Údico, isotérmico
2	9,9	171.3	58.3	Templado subhúmedo	Cw	Údico, isotérmico
3	9,9	171.3	58.3	Templado subhúmedo	Cw	Údico, isotérmico
Jal	18.0	149.3	79.8	Templado subhúmedo	Cw	Údico, isotérmico
16	22.1	366.5	110.5	Cálido húmedo	Afm	Údico, isotérmico

TMA Temperatura media anual PA Precipitación anual EPA Evapotranspiración anual

Tabla 4.4 Clasificación de los perfiles

Perfil	Localidad	Soil Taxonomy (1990)	FAO-UNESCO (1988)
Chis	Chiapas	Vitrandic Udorthent	Regosol vítrico
Tall	La Primavera	Typic Ustorthent	Regosol eútrico
Tal	La Primavera	Typic Eutrochrept	Cambisol eútrico
63	Tlatlauquitepec	Typic Ustivitrand	Andosol vítrico ústico
14	Las Margaritas	Lithic Udivitrand	Andosol vítrico lítico
6	Teziutlán	Typic Udivitrand	Andosol vítrico údico
Si3	Hueytamalco	Typic Udivitrand	Andosol vítrico
110	Teziutlán	Typic Fulvudand	Andosol húmico
Si1	Hueytamalco	Typic Hapludand	Andosol úmbrico
Si2	Hueytamalco	Typic Hapludand	Andosol ócrico
15	Las Margaritas	Eutric Hapludand	Andosol eútrico
2	Chichinautzin	Eutric Hapludand	Andosol eútrico
3	Chichinautzin	Typic Hapludand	Andosol dístrico
Jal	Jalapa	Typic Hapludand	Andosol dístrico
16	Las Margaritas	Typic Hapludand	Andosol óxico

Perfil 63 (Huitzitzilapa, Pue.).

Se localiza en la localidad de Huitzitzilapa, dentro del municipio de Tlatlauquitepec, Pue. Su material parental está compuesto una toba ácida de 7000 años de edad (Negendank, et al., 1985). En estos suelos se presentan cultivos de trigo y agricultura de temporal (tabla 4.2). El clima es templado-subhúmedo y el edafoclima es ústico, isotérmico (tabla 4.3). La clasificación propuesta (tabla 4.4) corresponde con un Typic Ustivitrands (Soil Taxonomy, 1990) o un Andosol vítrico (FAO-UNESCO, 1988).

Este es un suelo que muestra altos porcentajes de material de tamaño de arena, los cuales se incrementan con la profundidad. El contenido de arcilla en Ap y AC es moderado y contrasta con el que se presenta en C. En el complejo adsorbente la CIC es moderada, al igual que la retención de fosfatos (50-60%) y la retención de humedad a 1500 kPa es baja (10-20%). La saturación de bases es menor que 50% en todos los casos (anexo 1, tabla 5) dada la naturaleza del material parental, pobre en bases. Este suelo presenta un desarrollo escaso, con un valor de DRP de 33, donde tanto el horizonte A como el AC presentan valores muy similares (anexo 1, tabla 2, Fig. 4.2k).

Perfil 14 (Las Margaritas, Pue.)

Localizado al NE del macizo de Teziutlán, en el municipio de Hueytamalco, Edo. de Puebla. Este perfil se deriva de materiales volcánicos andesíticos de edad holocénica. La vegetación que lo caracteriza es el pastizal inducido (tabla 4.2). El clima de la zona es cálido subhúmedo con un edafoclima de tipo údico, isotérmico (tabla 4.3). La clasificación propuesta (tabla 4.4) corresponde con un Lithic Udivitrands (Soil Taxonomy, 1990) o un Andosol vítrico (FAO-UNESCO, 1988).

Este suelo se encuentra limitado por una roca riolítica, situada a menos de 50 cm de la superficie. Posee un perfil A/Bw/C (Fig. 4.2c). Texturalmente se ubica en la clase de arena fina, con bajas densidades aparentes (0.75-0.92 g/cm^3) debidas a la presencia de vidiro volcánico. La retención moderadamente baja de agua 1500 kPa es resultado de la textura gruesa que muestra, sin embargo, es diagnóstica para Andisoles vítricos. La CIC es moderada, así como la retención de fosfatos, 14-25 cmol/Kg de suelo y 60-75% respectivamente, valores que se espera se incrementen a medida que se acentúe la lixiviación de las bases (anexo 1, tabla 6). El valor de DRP es de 45.5, siendo el horizonte Bw el de mayor desarrollo con un valor de 21.5 (anexo 1, tabla 2). Este suelo, debido a sus características pedológicas, puede ser considerado como representativo de la primera etapa evolutiva propuesta por Hetier (1975), en su fase más evolucionada.

Perfil 6 (Tlatlauquitepec, Pue.).

Se localiza en la localidad de Los Coles, dentro del municipio de Tlatlauquitepec, Pue. Su material parental está compuesto por piroclastos básicos de 5000 años de edad (Negendank, et al., 1985). La vegetación que caracteriza a esta zona es el pastizal inducido y el bosque de pino-encino (tabla 4.2). El clima es templado-subhúmedo y el edafoclima es údico, isotérmico (tabla 4.3). La clasificación propuesta (tabla 4.4) corresponde con un Typic Udivitrand (Soil Taxonomy, 1990) o un Andosol vítrico (FAO-UNESCO, 1988).

Este es un suelo que muestra altos porcentajes de material fino de tamaño de limo, sobre todo en Ap. El contenido de arcilla es bajo y, aparentemente, no se presenta migración de este material ya que los valores del índice de arrastre son muy altos. En el complejo adsorbente la CIC es alta si se considera el bajo porcentaje de arcilla, por lo que, probablemente, esté relacionado con el contenido de amorfos. La retención de fosfatos es elevada (63-72%) y la retención de humedad a 1500 kPa es baja a moderada (22-28%) (anexo 1, tabla 7). Este suelo presenta un pobre desarrollo, con un valor de DRP de 9, con un perfil poco diferenciado y de poca profundidad (anexo 1, tabla 2, Fig. 4.2l), que, al estar sepultando a un suelo más antiguo, comienza a tener una evolución conjunta.

Perfil Si3 (Hueytamalco, Pue.).

Se encuentra en el rancho "La Carambada", Municipio de Hueytamalco, Edo. de Puebla, derivado de piroclastos de naturaleza ácida de 7500 años (Negendank, et al., 1985). La vegetación presente en estos suelos es un bosque caducifolio (tabla 4.2). El clima es semicálido subhúmedo y el edafoclima es údico, isotérmico (tabla 4.3). La clasificación propuesta (tabla 4.4) corresponde con un Typic Udivitrands (Soil Taxonomy, 1990) o un Andosol vítrico (FAO-UNESCO, 1988).

Este es un suelo profundo con buen drenaje, donde dominan los materiales del tamaño de arena, los cuales disminuyen con la profundidad. Los contenidos de arcilla son moderados, presentándose el valor más alto en C_2. La CIC es moderada a alta en los primeros 90 cm, decreciendo con la profundidad. La retención de fosfatos muestra valores moderados al igual que la retención de humedad a 1500 kPa con valores que van de 25% en los horizontes superficiales a 12% en C_2. La relación S/T es menor que 50% a consecuencia del bajo contenido de bases que presenta el material parental (anexo 1, tabla 8). El valor de DRP es bajo (18) (anexo 1, tabla 2). Este es un perfil que ha formado un horizonte A muy profundo y bien diferenciado, con un desarrollo que va de pobre a moderado. (Fig. 4.2ñ)

Perfil 110 (Tlatlauquitepec).

Se localiza en el municipio de Tlatlauquitepec, en la localidad de La Unión, Pue. Su material parental está constituido por materiales volcánicos básicos, de 5000 años de edad (Negendank, et al., 1985). La vegetación que caracteriza a esta zona es el pastizal inducido y el bosque de pino-encino (tabla 4.2). El clima es semicálido-subhúmedo y el edafoclima es údico, isotérmico (tabla 4.3). La clasificación propuesta (tabla 4.4) corresponde con un Typic Fulvudand (Soil Taxonomy, 1990) o un Andosol húmico (FAO-UNESCO, 1988).

Este es un suelo que muestra altos porcentajes de arena, que se incrementan a profundidad. El contenido de arcilla es muy bajo y, aparentemente, no existe migración, aunque en B_{22} y C_1, el índice de arrastre presenta los valores más bajos (2.68), lo que prodría evidenciar un ligero lavado de arcilla. La CIC es muy alta, relacionada muy probablemente con los altos contenidos de materia orgánica que se tienen (anexo 1, tabla 9). La retención de fosfatos es elevada (70-86%) y la retención de humedad a 1500 kPa es baja (15-25%). El valor de DRP es moderado (71) siendo el horizonte más desarrollado el A, con valores de 22 y 23 para A_{11} y A_{12}, respectivamente (anexo 1, tabla 2, Fig. 4.2j). Este suelo presenta un desarrollo que va de pequeño a moderado, ya que la formación de sustancias organo-minerales frena o atenúa otros procesos edafogénicos.

Perfil Si1 (Hueytamalco, Pue.)..

Se encuentra en la zona cafetalera del Municipio de Hueytamalco, Edo. de Puebla, derivado de piroclastos de naturaleza ácida de 7500 años (Negendank, et al., 1985). La vegetación presente en estos suelos es un bosque caducifolio (tabla 4.2). El clima es semicálido subhúmedo y el edafoclima es údico, isotérmico (tabla 4.3). La clasificación propuesta (tabla 4.4) corresponde con un Typic Hapludand (Soil Taxonomy, 1990) o un Andosol úmbrico (FAO-UNESCO, 1988).

Este es un suelo profundo con buen drenaje, donde dominan los materiales del tamaño de arena. Los contenidos de arcilla son bajos, aunque en A_2, existe un porcentaje mayor, con un índice de arrastre de 0.90, lo que evidencia lavado de arcilla hacia este horizonte. La CIC es moderada a alta en los primeros 50 cm, decreciendo con la profundidad. La retención de fosfatos muestra valores moderados al igual que la retención de humedad a 1500 kPa con valores que van de 33% en los horizontes superficiales a 20% en C_2. La relación S/T es menor que 50%, que les confiere un carácter distrófico (anexo 1, tabla 10). El valor de DRP es moderado (37) (anexo 1, tabla 2). Este es un perfil que muestra una buena diferenciación y un desarrollo moderado (Fig. 4.2m).

Perfil Si2 (Hueytamalco, Pue.)

Se encuentra en la zona cafetalera del Municipio de Hueytamalco, Edo. de Puebla, derivado de piroclastos de naturaleza ácida de 7500 años (Negendank, et al., 1985). La vegetación presente en estos suelos es un bosque caducifolio (tabla 4.2). El clima es semicálido subhúmedo y el edafoclima es údico, isotérmico (tabla 4.3). La clasificación propuesta (tabla 4.4) corresponde con un Typic Hapludand (Soil Taxonomy, 1990) o un Andosol ócrico (FAO-UNESCO, 1988).

Este, al igual que el anterior, es un suelo profundo con buen drenaje, donde dominan los materiales finos. Los contenidos de arcilla son altos, presentándose el valor más elevado en A_{11}, con un índice de arrastre de 0.89, lo que evidencia lavado de arcilla hacia este horizonte. La CIC es moderada a alta en los primeros 50 cm, decreciendo con la profundidad, relacionada con los altos porcentajes de arcilla que se presentan. La retención de fosfatos muestra valores moderados al igual que la retención de humedad a 1500 kPa con valores que van de 33% en los horizontes superficiales a 17% en C_2. La relación S/T es menor que 50%, que les confiere un carácter distrófico (anexo 1, tabla 11). El valor de DRP es moderado (53) (anexo 1, tabla 2). Este perfil se encuentra bien diferenciado y muestra un desarrollo moderado (Fig. 4.2n).

Perfil 15 (Las Margaritas, Pue.)

Este perfil también se localiza en el municipio de Hueytamalco, Edo. de Puebla, y procede de materiales volcánicos andesíticos de edad holocénica, bajo una vegetación de pastizal inducido y una topografía ondulada (tabla 4.2). El clima de la zona es cálido subhúmedo con un edafoclima de tipo údico, isotérmico (tabla 4.3). La clasificación propuesta (tabla 4.4) corresponde con un Eutric Hapludand (Soil Taxonomy, 1990) o un Andosol eútrico (FAO-UNESCO, 1988).

El *solum* está constituido principalmente por limo, sobreyaciendo a capas muy arenosas, lo que además de propiciar un cambio textural abrupto entre los horizontes B_2 y Cw, genera cambios en la porosidad y drenaje interno del suelo. La CIC es elevada, y según los valores de ph delta (-0.8 a -1.2) el complejo adsorbente está formado por cargas variables de la superficie de los amorfos. La relación S/T en todos los casos es elevada (>90%) dándole un carácter eutrófico. La retención de fosfatos es moderada (50-60%) al igual que la retención de humedad (33-45%) (anexo 1, tabla 12). El valor de DRP es de 87, lo que lo sitúa como un suelo con desarrollo moderado, siendo el horizonte B_2 el que mayor desarrollo ha alcanzado con un valor de 35 (anexo 1, tabla 2, Fig. 4.2d).

Perfil 2 (Chichinautzin, Mor.)

Este perfil se localiza en la vertiente sur de la Sierra Chichinautzin, Edo. de Morelos, en donde afloran rocas y materiales volcánicos de naturaleza básica-intermedia, con una edad estimada en 8,500 años (Solleiro, 1992; tabla 4.2), bajo una vegetación de bosque de pinos que cubre un 60% de la superficie del suelo, alternando con pastizal inducido. El clima de la zona es de tipo templado subhúmedo, con un edafoclima de tipo údico e isotérmico en sus regímenes de humedad y temperatura, respectivamente (tabla 4.3). La clasificación propuesta (tabla 4.4) corresponde con un Eutric Hapludand (Soil Taxonomy, 1990) o un Andosol eútrico (FAO-UNESCO, 1988).

Este perfil presenta sus tres horizontes A, B y C muy bien diferenciados con subhorizontes AB, BC, B_{21} y B_{22}. Es un suelo profundo y bien drenado, cuyo horizonte A es un ócrico (Fig. 4.2a). Su granulometría es distintiva por presentar cantidades moderadas de materiales finos (anexo 1, tabla 13); no existe lavado de arcilla. Su densidad en masa es típica de suelos con características ándicas (0.87-0.89 g/cm^3). El contenido de agua a 33 kPa es alto (mayor que 50%) al igual que la retención de fosfatos (85-95%). El complejo adsorbente está representado por un valor alto de CIC en la parte superior del perfil (38.5 cmol/Kg de suelo). La relación S/T se incrementa con la profundidad y en todos los casos cumple con las características de un suelo eútrico (anexo 1, tabla 13). De acuerdo a sus

características morfológicas, se le ha asignado un valor de DRP de 108.5 para todo el perfil, siendo los horizontes A y B_{22} los más desarrollados con valores de 24.0 y 23.5, respectivamente (anexo 1, tabla 2). Por sus características pedológicas, puede considerarse que este suelo ha alcanzado un buen desarrollo, ubicándose en una fase madura.

Perfil 3 (Chichinautzin, Mor.)

Este perfil se localiza en la vertiente sur de la Sierra Chichinautzin, Edo. de Morelos, cuyo material parental está compuesto de materiales volcánicos de naturaleza básica-intermedia, con una edad estimada en 8,500 años (Solleiro, 1992; tabla 4.2), bajo una vegetación de bosque de pino-encino que cubre un 60% de la superficie del suelo, alternando con pastizal inducido. El clima de la zona es de tipo templado subhúmedo, con un edafoclima de tipo údico e isotérmico en sus regímenes de humedad y temperatura, respectivamente (tabla 4.3). La clasificación propuesta (tabla 4.4) corresponde con un Typic Hapludand (Soil Taxonomy, 1990) o un Andosol dístrico (FAO-UNESCO, 1988).

Este perfil presenta horizontes A, B y C con subhorizontes AB, BC, B_{21} y B_{22}. Es un suelo profundo, bien drenado, con un horizonte A ócrico (Fig. 4.2b). El contenido de material fino (limo y arcilla) es ligeramente más alto que en el caso anterior y la relación limo/arcilla es menor (excepto en el horizonte A) evidenciando una mayor alteración mineral (anexo 1, tabla 14). La densidad en masa es menor que 0.90 g/cm^3, valor característico de suelos ándicos; la retención de humedad a 1500 kPa es baja, con valores que oscilan entre 28 y 34% y la retención de fosfatos es de 90% en los primeros 90 cm. El complejo adsorbente está representado por valores altos de CIC, mientras que el grado de saturación de bases es menor que 50%, que marca un carácter dístrico y una tendencia a la acidificación (anexo 1, tabla 14). El valor de DRP es de 87.2, siendo el horizonte B_{22} el de mayor desarrollo, alcanzando un valor de 25.5 (anexo 1, tabla 2). Por sus características pedológicas, puede considerarse que este suelo ha alcanzado un buen desarrollo, ubicándose en una fase madura.

Perfil Jal (Jalapa, Ver.)

Localizado en el Municipio de Jalapa, Edo. de Veracruz, este perfil se deriva de cenizas de composición andesítica de 5500 años de edad (Negendank et al., 1985), bajo una vegetación de bosque mesófilo de montaña (tabla 4.2). El clima es de tipo templado subhúmedo, mientras que el edafoclima es del tipo údico, isotérmico (tabla 4.3). La clasificación propuesta (tabla 4.4) corresponde con un Typic Hapludand (Soil Taxonomy, 1990) o un Andosol dístrico (FAO-UNESCO, 1988).

Este es un suelo profundo y bien drenado (Fig. 4.2i), que presenta altos contenidos de materiales finos en todo el perfil, presentándose los valores más altos de arcilla en B_{12} que se encuentran en forma de películas, evidenciando la migración de este material y constituyendo un horizonte iluvial. Los valores de DA son menores que 0.9 g/cm^3, valores típicos de suelos con propiedades ándicas. Los valores de retención de humedad son alto (30-34%) al igual que los de retención de fosfatos (82-88%). La CIC es relativamente baja si se considera la cantidad de arcilla y materia orgánica. Es un suelo con características dístricas, con valores de S/T menores que 50% en todos los horizontes (anexo 1, tabla 15). El valor de DRP es alto (87). Este es un suelo que muestra un alto grado de desarrollo, constituyendo un perfil profundo y bien diferenciado.

Perfil 16 (Las Margaritas, Pue.).

Este suelo se encuentra hacia el NW de los dos anteriores, también dentro del estado de Puebla, procedente de cenizas volcánicas andesíticas de edad holocénica, bajo una vegetación de pastizal inducido (tabla 4.2). El clima de la zona es cálido subhúmedo con un edafoclima de tipo údico, isotérmico (tabla 4.3). La clasificación propuesta (tabla 4.4) corresponde con un Typic Hapludand (Soil Taxonomy, 1990) o un Andosol óxico (FAO-UNESCO, 1988).

En este suelo predominan las texturas finas con valores de densidad aparente de 0.7 a 0.8 g/cm^3. En el complejo adsorbente la CIC es, aparentemente baja, si se considera el contenido alto de arcilla y de materia orgánica (anexo 1, tabla 16). Este es un suelo fuertemente desaturado como lo indican los valores S/T (<40%) lo que le confiere un carácter dístrico. Muestra valores altos de retención de fosfatos y de retención de humedad a 1500 kPa (>85% y 35-46%, respectivamente). Este perfil se encuentra entre los Andisoles más evolucionados, según la teoría de Hetier (1975) , con un perfil muy bien diferenciado (Fig. 4.2e), a pesar de contar con valores no muy altos de DRP (90) (anexo 1, tabla 2), ya que sus propiedades físicas, químicas y morfológicas así lo demuestran (anexo 1, tabla 16).

4.2.2 Secuencia evolutiva de los suelos analizados

Con base en las propiedades físicas, químicas y morfológicas y de acuerdo a los postulados previamente expuestos sobre la secuencia de desarrollo de los Andisoles, se construyó una secuencia de evolución de los perfiles analizados, que va desde los suelos menos evolucionados hasta aquéllos que han alcanzado un alto grado de desarrollo, independientemente de su condición climática y de

material parental. Al establecer esta secuencia se trata de mostrar las relaciones genéticas entre los suelos y sus posibilidades de paso de uno a otro.

Los primeros suelos que caracterizan a la secuencia son suelos con características vítricas o que aún no han constituído Andisoles y se encuentran en el orden de los Entisoles, e Inceptisoles. En la siguiente etapa se consideran los suelos con características húmicas, ya que estas sustancias les proporcionan una enorme estabilidad, originando que los procesos edafogénicos se vuelvan más lentos. Siguiendo la secuencia, se ha establecido a los Andisoles con propiedades dístricas y eútricas, ya que ambos procesos pueden llevarse a cabo de acuerdo con las condiciones del medio (geoforma, drenaje y microclima) y ubicarlos en el mismo estadío evolutivo. Finalmente se han considerado a los Andisoles más lixiviados, con altos porcentajes de amorfos de hierro y que, inclusive, pudieran presentar características óxicas, sin llegar a constituir Ferralsoles u horizontes óxicos.

Así, la secuencia teórica que se supone han seguido los suelos es la siguiente:

Chis->Tall->Tal->63->14->6->Si3->110->Si1->Si2->15->2->3->Jal-> 16

que va desde los Entisoles hasta los Andisoles más desarrollados

Vitrandic Udorthent->Typic Ustorthent->Typic Eutrochrept-> Typic Ustivitrand->Lithic Udivitrand-> Typic Udivitrand->Typic Fulvudand->Typic Hapludand->Typic Hapludand (eútricos y dístricos)->Typic Hapludand (óxicos)

Claro que esta secuencia podría variar en cuanto a los suelos dístricos y eútricos, ya que se trata de dos líneas evolutivas que pueden seguir los suelos, dependiendo de las condiciones locales en las que se encuentren. Sin embargo, Martini y Palencia (1975) y Duchauffour (1984) consideran que los suelos eutróficos son más jóvenes que los dístricos y que están al comienzo de su evolución.

4.2.3 Descripción de las propiedades usadas en el modelo

Como se ha mencionado en capítulos previos, las propiedades utilizadas para la generación del modelo se consideran diagnósticas para el orden Andisol. Sin embargo, no todas ellas fueron empleadas, sino que se seleccionaron las que se consideraron de fácil obtención dentro de los análisis de rutina y que estaban disponibles en todos los perfiles. La selección se basó, en parte, considerando la teoría de Simonson (1978) sobre la formación del suelo, la cual establece lo siguiente:

El suelo se forma por:

1. Adiciones sólidas comunes de la atmósfera, como son limo, arcilla y carbonatos y iones de Ca^{+2}, Na^{+} y SO_4^{-} disueltos en el agua de lluvia.
2. Transformaciones comunes que implican la formación de partículas de tamaño arcilla por intemperismo de granos más grandes y por la alteración de minerales primarios, la alteración de minerales de arcilla a otras especies minerales y la disminución del contenido de hierro por intemperismo.
3. Transferencias dentro del perfil que resultan en la acumulación en el horizonte B de limo, arcilla, Fe, Al, $CaCO_3$, yeso y halita.
4. Pérdidas de elementos.

De esta manera, se considera que si el material parental de un suelo posee texturas gruesas, ya sea gravillentas o arenosas, gran parte de la acumulación de limo y arcilla en los horizontes B son de carácter pedogénico (Birkeland, 1984a), es decir derivada de la desintegración de las partículas de arena y grava. Los cambios texturales producidos por una microdivisión de las partículas de mayor tamaño son muy importantes en suelos subtropicales y tropicales (Robert y Tessier, 1992), tal que la acumulación de arcilla aumenta con el tiempo en diferentes ambientes, de manera proporcional al grado con que actuan los diferentes factores ambientales involucrados. Por esta razón se tomaron como parte del análisis los contenidos de grava, arena, limo y arcilla (anexo 1, tablas 1-16).

En los climas templados, el intemperismo de los minerales primarios es muy incompleta, de tal forma que los feldespatos, en particular, no se encuentran muy alterados; el contenido de arcilla es poca, procedente sobre todo de la alteración de las micas, y las tres cuartas partes del complejo de alteración están constituidas por elementos solubles, que son eliminados del perfil por drenaje profundo (Duchaufour, 1984). La alteración en clima tropical es prácticamente total. Las pérdidas de sílice y de bases en estado soluble son más importantes que en clima templado y, por el contrario, las pérdidas de sequióxidos son menores. Estas consideraciones permiten establecer que existen ciertos índices, basados en las relaciones moleculares de óxidos totales, que evidencian el grado de alteración y desarrollo del perfil. Tales índices son las relaciones sílice/aluminio (Sa), sílice/sesquióxidos (Ses), bases/sesquióxidos (bases), los índices de Parker y lixiviación y la relación hierro/sílice (Fes). Asimismo, los balances geoquímicos proporcionan una medida sobre las pérdidas y ganancias relativas de elementos que ha sufrido el perfil, por lo que, también, son reflejo del grado de evolución alcanzado por el suelo.

Los valores de los análisis químicos de óxidos totales de los perfiles se presentan en la tabla 17 (anexo 1), mientras que los resultados del cálculo de índices señalados aparecen en la tabla 18 (anexo 1). Dichos valores, por sí mismos,

proporcionan valiosa información con respecto al grado de evolución de los perfiles. Los suelos con menor grado de desarrollo poseen valores altos en sus relaciones Sa, Ses y en sus índices de Parker y lixiviación. Por su parte, la relación Fes refleja el tipo de amorfos que posee cada suelo, marcando la diferencia entre los amorfos silicatados y los de hierro (Yong et al., 1992). Este valor es pequeño para el caso de los suelos muy jóvenes (cercano a cero) y mayor cuando se trata de suelos más alterados con un porcentaje más elevado de amorfos de hierro y aluminio. Con base en estos índices, se observa que el suelo más desarrollado corresponde al perfil 16, y el de menor desarrollo al perfil Chis.

Con respecto al balance geoquímico, la interpretación es más difícil, ya que no se cuenta con un patrón definido en cuanto a las pérdidas y ganancias de elementos. Teóricamente, el sílice y las bases se pierden más fácilmente debido a su alta movilidad, mientras que el hierro (Fe_2O_3), el aluminio (Al_2O_3) y el titanio deben aumentar dada su relativa estabilidad. Esto parece cumplirse en el caso del perfil más joven (Chis) y el más desarrollado (16), pero no es una norma para el resto de los suelos (anexo 1, tabla 19). Sin embargo, analizando las pérdidas y ganancias de elementos es posible establecer el tipo de procesos que se llevan a cabo en los suelos, sobre todo aquéllos relacionados con lavado y acumulación de elementos.

Otro de los criterios tomados para la selección de las propiedades, se refiere a la morfología del perfil, la cual va cambiando a lo largo del tiempo. Uno de los índices que mejor expresan estas variaciones es el índice de desarrollo relativo del perfil (DRP) formulado por Bilzi y Ciolkosz (1977). Este índice señala que los perfiles con mayor grado de desarrollo son el 2 con un valor de 108.5; el 16, con 89; el 3 con 87.2; y el 15 y Jal con un valor de 87; por su parte, los más jóvenes son los perfiles 6 y Chis con 9 y 13, respectivamente (anexo 1, tabla 2).

En cuanto a las propiedades físicas y químicas consideradas, se tomaron la densidad aparente a 0.33 kPa (DA); la retención de agua a 1500 kPa (Ret); el contenido de materia orgánica (MO); la estabilidad estructural, dada por la relación arena/(limo+arcilla) (Est); el pH delta (pHd); la retención de fosfatos (Pret); la capacidad de intercambio catiónico (CIC); el pH medido en NaF (pHN) (anexo 1, tablas 1-16).

4.3 Factores formadores

Las propiedades del suelo están directamente relacionadas con las características de los factores formadores: material parental (m), clima (cl), organismos (o), relieve (r) y tiempo. Cada uno de estos factores ha sido analizado de acuerdo a los datos seleccionados y representado por índices, que les confieren un carácter cuantitativo, de tal forma que pueden ser manejados más

fácilmente. La edad cronológica de los suelos ha sido estimada de acuerdo a la edad de los materiales parentales, sin embargo, ésta puede ser muy diferente a la edad evolutiva, ya que las rocas más antiguas no han producido a los suelos más viejos, sino que está en función de la conjunción de los cuatro factores antedichos y directamente relacionada con la historia genética de cada suelo.

La condición tomada para valorar un índice para cada factor ha sido la influencia que tiene en el desarrollo del suelo, lo cual se ha realizado tomando como base la matriz de correlación de Phillips, 1993b (tabla 4.5).

Tabla 4.5. Matriz de correlación

	S	cl	o	r	m
S	a_{11}	0	a_{13}	a_{14}	a_{15}
cl	a_{21}	0	a_{23}	0	a_{25}
o	a_{31}	a_{32}	a_{33}	0	a_{35}
r	a_{41}	a_{42}	0	0	0
m	a_{51}	0	0	a_{54}	0

En esta matriz, las características que no poseen una influencia con respecto al desarrollo se les asigna un valor de cero.

Los índices empleados para cada elemento de la matriz son los siguientes:

a_{11} Desarrollo relativo del suelo (**DRP**)

a_{13} Densidad de cobertura vegetal **DCV** (desarrollo del suelo gracias a la vegetación)

a_{14} Profundidad del horizonte A, epipedón y horizonte B (el desarrollo del suelo se ve limitado o favorecido por el relieve y el drenaje)

a_{15} Profundidad del horizonte Cw (suelos bien desarrollados limitan el intemperismo de la roca)

a_{21} Índice de agresividad climática **Agcl** (el clima actúa directamente en el desarrollo del suelo)

a_{23} Índice de crecimiento vegetal **ICV** (el clima está directamente relacionado con el crecimiento de la vegetación)

a_{25} Índice de alteración mineral **Alml** (el clima está directamente relacionado con el intemperismo de minerales)

a_{31} Índice de humificación, relación **C/N** (la vegetación actúa en el desarrollo del suelo)

a_{32} Índice de degradación de la materia orgánica **IDMO** (la materia orgánica actúa en muchos procesos dentro del suelo)

a_{33} Tipo de vegetación y área de cobertura **Cove** (el tipo de vegetación es responsable de procesos pedogenéticos)
a_{35} Índice de intemperismo biológico **IB** (la vegetación permite el intemperismo de las rocas).
a_{41} Pendiente **P** (el relieve y el drenaje pueden retardar el desarrollo del suelo por erosión)
a_{42} Drenaje climático local **Drcl** (el relieve incide en los procesos de distribución del drenaje superficial)
a_{51} Índice de intemperismo de cada mineral (la roca se intemperiza dependiendo de su composición mineralógica)
a_{54} Índice de erodabilidad de los materiales, factor **K** (al intemperizarse y erosionarse los materiales, se reduce el relieve)

4.3.1 Clima

El clima es uno de los factores formadores fundamentales, ya de de él dependen la intensidad de los procesos de alteración de los materiales parentales y suelos. Cada uno de los perfiles se encuentra bajo climas diferentes, que abarcan tanto condiciones de clima templado subhúmedo (perfiles 2, 3, 6, 63, Jal, Tal, Tall) como clima subtropical: (a) cálido subhúmedo (14, 15, 16), (b) semicálido subhúmedo (110, Si1, Si2 y Si3) y tropical, cálido húmedo (Chis) (tabla 4.3).

Con base en la información de las estaciones climáticas, se obtuvo el balance de agua en el suelo y se calcularon los parámetros necesarios para los índices relacionados con este factor (temperatura, precipitación, evapotranspiración, índice hídrico, índice de calor). Las estaciones que se consideraron representativas para cada perfil son las siguientes: Tres Cruces, para los perfiles 2 y 3 (anexo 1, tabla 20); San José Acateno, para los perfiles 14 y 15 (anexo 1, tabla 21), Las Minas y San José Acateno para el perfil 16, Si1, Si2 y Si3 (anexo 1, tablas 21 y 22); Tala, para los perfiles Tal y Tall (anexo 1, tabla 23); Jalapa, para el perfil Jal (anexo 1, tabla 24); Chapultenango, para el perfil Chis (anexo 1, tabla 25). Las Minas, para el 110 (anexo 1, tabla 22); Zautla, para el 63 (anexo 1, tabla 26); y Teziutlán, para el 6 (anexo 1, tabla 27). Asimismo, con estos datos, se estableció el edafoclima, resultando ser údico, isotérmico para los perfiles 2,3,14, 15, 16, Jal, Chis, 110, 6, Si1, SI2 y Si3; ústico, isotérmico para el perfil 63; y ústico, hipertérmico, para Tal y Tall (tabla 4.3).

Los índices empleados para caracterizar al clima son: índice de agresividad climática (Agcl), índice de lluvia de lavado (Ln), índice de alteración mineral (Alml), índice de crecimiento vegetal (ICV), y drenaje climático (Drcl) los cuales, a su vez, están relacionados con el resto de los factores. Los valores obtenidos para cada estación (tabla 4.6) reflejan que los perfiles expuestos a mayor

alteración debido a la influencia del clima son 14, 15, 16, Chis, 110, Si1, Si2, SI3. Por lo que respecta a los suelos con mayor potencial de lixiviación, se encuentran los perfiles Chis, 16, Si1, Si2, Si3 y 110. La alteración mineral es más acentuada en el perfil Chis, aunque los valores de los perfiles que se encuentran en el subtrópico no dejan de ser altos. Los sitios donde el clima favorece de una manera óptima el crecimiento vegetal son los correspondientes a los perfiles 110, Si1, Si2, 16 y Chis.

4.3.2 Organismos

Con respecto a los organismos que intervienen en la formación del suelo, se ha tomado, principalmente a la vegetación, ya que es mejor conocida su influencia. La vegetación que caracteriza a cada perfil se encuentra en la tabla 4.4, en la que se observa que los perfiles 2 y 3 se encuentran bajo un bosque de pino; los perfiles 14, 15, 16, bajo pastizal inducido; Tal y Tall, bajo bosque de encino-pino, sotobosque arbustivo y herbáceo; el perfil 110, bajo pastizal inducido y un bosque de pino-encino; en 6 y 63 se presenta agricultura de temporal; en Jal, se presenta un bosque mesófilo de montaña, mientras que en Chis, sólo existen pastos pioneros; finalmente, en Si1, Si2 y Si3, se encuentra un bosque caducifolio. Cabe señalar que gran parte de esta vegetación ha sido alterada por efectos antrópicos, por lo que difícilmente puede evaluarse en un sentido pleno, así que los índices pueden ser muy teóricos y no reflejar el comportamiento real de la vegetación sobre los suelos.

Los índices empleados para caracterizarla son: índice de degradación biológica (IDB), índice de degradación de la materia orgánica (IDMO), la relación C/N; el tipo de vegetación y su área de cobertura (índice de cobertura vegetal, Cove). De esta manera, los suelos con mayor potencial de alteración por la influencia de la vegetación son los correspondientes al perfil Chis, aunque por el momento la alteración es producida por la vegetación pionera; mientras que los menos susceptibles son aquellos localizados en la zona templada, perfiles 2, 3, Tal y Tall (tabla 4.7). Los perfiles que se encuentran en el subtrópico poseen valores intermedios entre estos dos extremos. Sin embargo, en estudios realizados en los suelos del trópico, se ha observado que el efecto de la vegetación es secundario (Gama, 1996).

Tabla 4.6. Valores de los índices relacionados con el clima

Perfil	Localidad	Agcl (mm)	Ln (mm)	Alml	ICV	Drcl* cm
Chis	Chiapas	40.49	358.62	86.91	155.68	301.73
Tall	La Primavera	15.41	35.98	7.99	13.70	14.39
Tal	La Primavera	15.41	35.98	7.99	13.70	14.39
63	Tlatlauquitepec	7.63	18.99	3.31	31.55	80.34
14	Las Margaritas	45.27	265.74	67.76	91.39	226.39
6	Teziutlán	113.52	107.13	19.16	154.97	-0.31
Si3	Hueytamalco	46.03	292.64	71.77	165.54	246.47
110	Teziutlán	46.79	319.54	75.78	239.70	266.54
Si1	Hueytamalco	46.03	292.64	71.77	165.54	246.47
Si2	Hueytamalco	46.03	292.64	71.77	165.54	246.47
15	Las Margaritas	45.27	265.74	67.76	91.39	226.39
2	Chichinautzin	30.41	144.57	15.60	11.73	117.44
3	Chichinautzin	30.41	144.57	15.60	11.73	117.44
Jal	Jalapa	18.11	84.41	16.39	67.29	60.13
16	Las Margaritas	46.03	292.64	71.77	165.54	246.47

* Drenaje climático general

Tabla 4.7. Valores de los índices relacionados con la vegetación

Perfil	IDB	IDMO	C/N	DCV (%)	CoVer
Chis	30.39	5.3	22.5	1	0.45
Tall	4.83	4.5	12.8	20	0.04
Tal	4.83	4.5	12.8	50	0.03
14	19.87	5.4	14.0	80	0.01
Si3	19.56	5.1		80	0.01
110	19.25	4.8	13.0	80	0.01
Si1	19.56	5.1		80	0.01
Si2	19.56	5.1		80	0.01
15	19.87	5.4	12.7	50	0.10
2	2.06	1.5	13.4	40	0.20
3	2.06	1.5	14.0	60	0.10
Jal	7.49	3.9	13.5	80	0.01
16	19.56	5.1	13.5	70	0.06

4.3.3 Relieve

Quizá uno de los aspectos del relieve que más interviene en la génesis del suelo es la pendiente, ya que, a la vez que permite o limita su desarrollo, es un factor que interviene ampliamente en la tipogénesis y en la profundidad. Si bien otro de los parámetros relacionados con el relieve es la altitud, no produce un efecto directo en la pedogénesis, sino que su influencia se ve en las variaciones del meso y microclima.

Los valores obtenidos para estos dos parámetros (pendiente y profundidad) se presentan en la tabla 4.35. Los perfiles más profundos son Si1, Si2, Si3, 110, Jal, 2, 3 y 16, sin embargo, sólo los cuatro últimos poseen un horizonte A, epipedón y horizonte B de espesor considerable (217, 160, 150 y 130 cm respectivamente), mientras que el resto debe su profundidad a que posee horizontes C gruesos, de tal forma que su desarrollo no es tan fuerte. Por su parte, los perfiles más delgados son el 14, 6 y Chis, aunque este último, en realidad, presenta sólo capas de horizontes C, mientras que el 14 muestra un horizonte A y Bw de 40 cm de espesor y el 6 un Ap de 20 cm. Finalmente, los perfiles Tal y Tall poseen un espesor moderado (120 cm), aunque el horizonte C se localiza a los 60 cm para el caso de Tal y a los 40 cm para Tall (tabla 4.8).

4.3.4 Material parental

El material parental es uno de los factores de mayor importancia, ya que si bien todos los perfiles derivan de materiales volcánicos, al variar la composición y espesor de los depósitos también hay cambios en la tipogénesis. De hecho, el material mineral no siempre interviene de una manera muy radical sino que, frecuentemente, actúa como un modulador de un proceso determinado, frenándolo a acelerándolo (Duchauffour, 1984). Sin embargo, para homogeneizar el criterio de análisis, este factor ha sido caracterizado por índices de intemperismo, que comparados con el suelo, dan idea del grado de desarrollo que éste ha alcanzado (relación sílice/aluminio, sílice/sesquióxidos, Parker, lixiviación, bases, hierro/sílice).

La mayor parte de los perfiles proceden de materiales piroclásticos de edad holocénica, con exepción de los perfiles Tal y Tall que se derivan de tobas riolíticas de 95000 años de edad (tabla 4.4). Los perfiles 2 y 3 se han formado a partir de cenizas basálticas de 8500 años, procedentes de las emanaciones de los volcanes localizados en la Sierra de Chichinautzin, Mor. En general se trata de depósitos de caída libre que ocupan un volumen de 2 a 3 Km^3, en un área de unos 50 Km^2 (Martín del Pozzo, 1982), lo que da un espesor estimado de 40 a 60 m de materiales volcánicos.

Los perfiles 15 y 16 proceden de materiales piroclásticos de composición basáltica, con una edad estimada de 5000 años, de acuerdo a las estimaciones de Negendank et al. (1985) realizadas para áreas vecinas. Son depósitos de caída libre que muestran un espesor de más de 10 m.

El perfil Jal, localizado en las inmediaciones de la Cd. de Jalapa, Ver., se deriva de cenizas, principalmente basálticas, de 5000 años, en cuyo depósito es posible observar una gran variedad de materiales producto de diferentes episodios volcánicos, que presentan gradación, evidenciando ser de caída libre. El espesor del depósito es considerable, aunque no se tienen datos concretos al respecto.

Los perfiles 6 y 110, en el área circundante a Teziutlán, Pue., proceden también de materiales volcánicos de naturaleza básica, cuya edad se ha estimado en 5000 años.

El perfil Chis se deriva de cenizas volcánicas de composición básica-intermedia, emitidas durante las fases eruptivas del volcán Chichonal, Chis, que se caracterizan por ser de tipo pliniano y peleano (Silva, 1983), y que ocupan una extensión y espesor considerable. La edad de los materiales colectados es de 3 años.

Finalmente, los perfiles Si1, Si2, Si3 y 14 proceden de piroclastos de naturaleza ácida, de edad aproximada de 7500-8000 años. Son depósitos ricos en vidrio, obsidiana, de caída libre, que ocupan grandes extensiones y espesores, formando grandes colinas y rellenando gran parte de la topografía preexistente.

Con respecto a los índices de alteración, en la tabla 18 (anexo 1) se presentan los valores correspondientes a cada uno. De acuerdo a estos datos, los perfiles con mayor grado de intemperismo son el 16, Jal, 2, 3, mientras que los aquéllos que muestran menor alteración son el Tal, Tall y Chis.

Por otro lado, también es necesario evaluar la susceptibilidad que poseen los materiales a la erosión, ya que de ello depende que los suelos se desarrollen o no. El índice de erodabilidad (K) proporciona información al respecto (Tabla 4.9), señalando que los suelos con mayor potencial de erodabilidad son Tall (principalmente), Tal, 16 y 15, en ese orden, mientras que los de mayor estabilidad son 2, 3, 14 y Jal.

Tabla 4.8. Valores de los índices relacionados con el relieve

Perfil	Localidad	Pend. (%)	Prof.[1] (cm)	Prof.[2] (cm)	Prof.[3] (cm)	Drclg[4] (cm)	Drcl[5] (cm)
Chis	Chiapas	7.5	124	0	21	301.73	40.23
Tall	La Primavera	18.1	125	40	70	14.39	0.80
Tal	La Primavera	12.5	120	60	120	14.39	1.15
63	Tlatlauquitepec	6.0	125	63	125	-0.31	-0.05
14	Las Margaritas	18.0	47	40	47	226.39	12.58
6	Teziutlán	10.0	40	20	40	80.34	8.03
110	Hueytamalco	15.0	200	106	150	266.54	17.77
Si3	Teziutlán	3.0	200	90	140	246.47	82.16
Si1	Hueytamalco	7.5	200	60	110	246.47	32.86
Si2	Hueytamalco	5.0	200	50	120	246.47	49.29
15	Las Margaritas	10.0	80	65	100	226.39	22.64
2	Chichinautzin	5.2	180	160	180	117.44	22.58
3	Chichinautzin	15.0	170	150	180	117.44	7.83
Jal	Jalapa	5.0	253	217	250	60.13	12.03
16	Las Margaritas	3.0	180	130	180	246.47	82.16

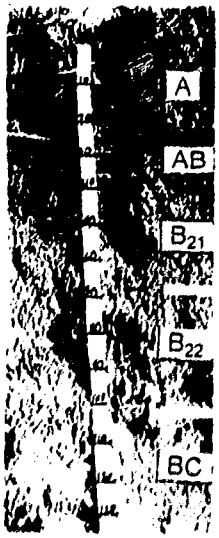
1 Profundidad total del suelo. 2 Profundidad de horizonte A, epipedón y horizonte B. 3 Profundidad del horizonte Cw
4 Drenaje climático local

Tabla 4.9. Valores del factor K de los suelos

Perfil	K	Perfil	K
2	0.08	Chis	0.15
3	0.08	110	0.10
14	0.08	6	0.10
15	0.23	63	0.10
16	0.27	Si1	0.13
Tal	0.29	Si2	0.13
Tall	0.41	Si3	0.13
Jal	0.08		

Fig. 4.2. Fotografías de los suelos empleados en el modelo

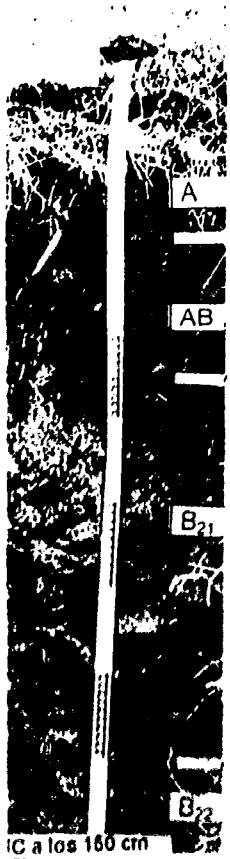
a. Perfil 2



C a los 160 cm

Eutric Hapludand

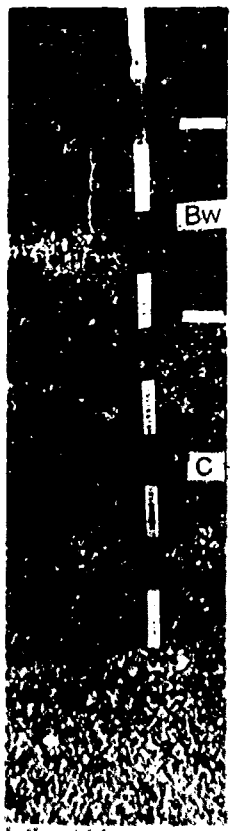
b. Perfil 3



C a los 160 cm

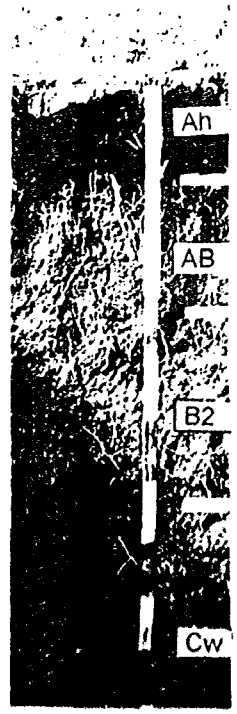
Typic Hapludand

c. Perfil 14



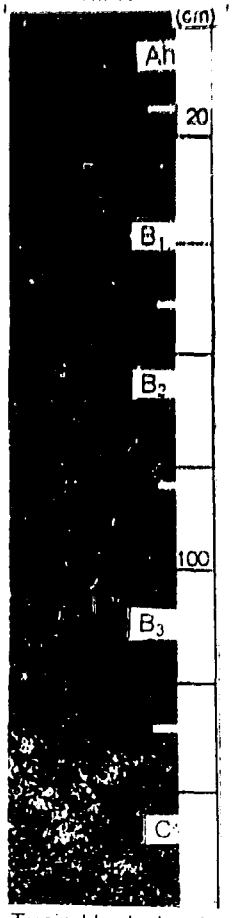
Lithic Udivitrand

d. Perfil 15



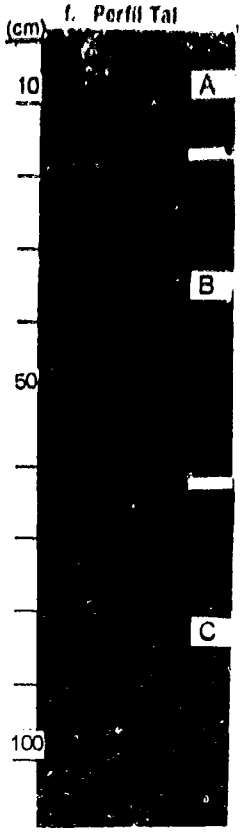
Eutric Hapludand

e. Perfil 16



Typic Hapludand

f. Perfil Tal

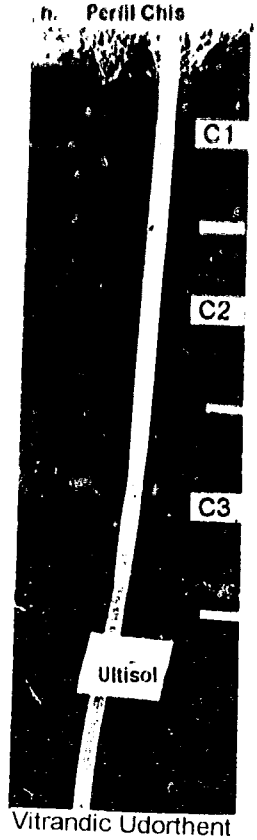


Typic Eutrochrept

g. Perfil Tall

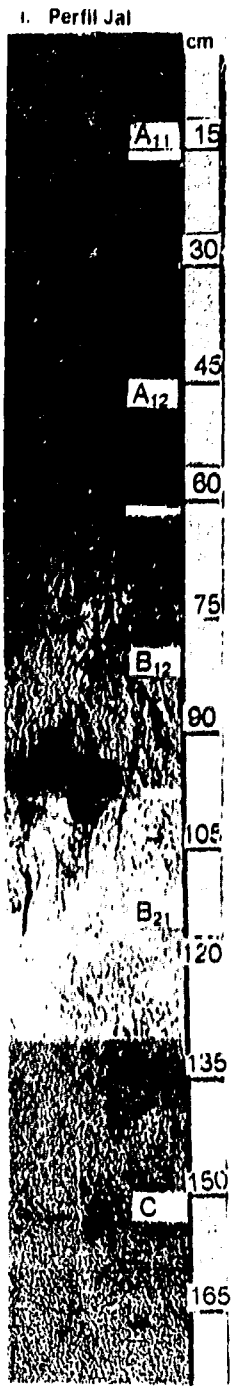
Typic Ustorthent

h. Perfil Chis



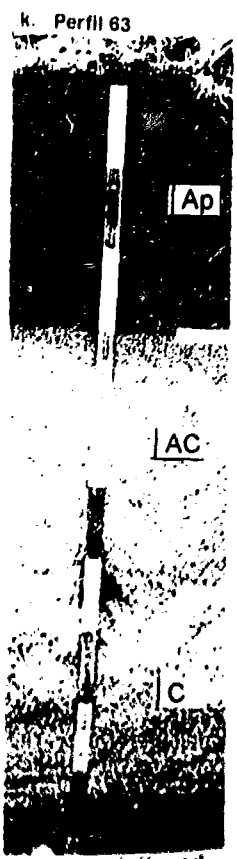
Vitrandic Udorthent

Fig. 4.2. Fotografías de los suelos empleados en el modelo

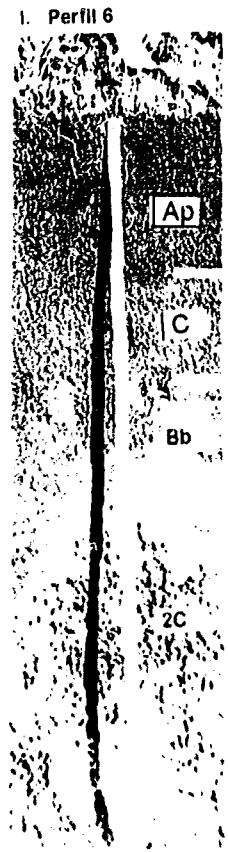


Typic Hapludand

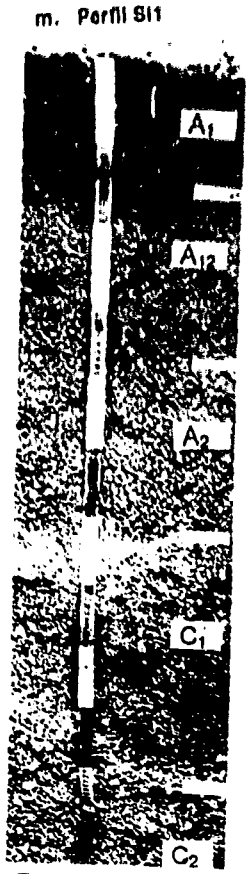
Typic Fulvudand



Typic Ustivitrand

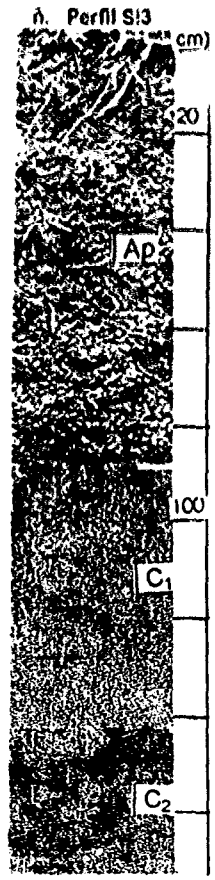


Typic Udivitrand



Typic Hapludand

Typic Hapludand



Typic Udivitrand

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

V. EL MODELO

5.1 Cambio de las propiedades e índices a lo largo del perfil

El análisis de las tendencias del cambio de las propiedades e índices involucrados en el modelo, a lo largo del perfil, se realizó de modo gráfico. En la gráfica, el eje X representa los diferentes horizontes del suelo en sentido creciente de la profundidad y el eje Y, los valores de las propiedades e índices correspondientes.

La regresión lineal fue el método estadístico que se ajustó, de una manera general, a las relaciones de interés. Se observaron tres tipos de tendencias: la regresión lineal con pendiente positiva, con pendiente negativa y pendiente igual o cercana a cero. Al mencionar que la tendencia de cambio es de tipo lineal con pendiente positiva, se implica que conforme aumenta la profundidad del perfil existe un aumento en el valor de la propiedad en cuestión. Por el contrario, cuando se menciona que la pendiente es negativa, se considera que con el aumento de la profundidad, el valor de la propiedad disminuye. Cuando se trata de pendientes iguales a cero, entonces no se observaron cambios de la propiedad en relación a la profundidad.

En otros casos, no existe una tendencia definida en el cambio o bien se consideró que los puntos no eran suficientes para poder definir un comportamiento claro de la dinámica de la propiedad en el perfil.

5.1.1 Propiedades morfoedáficas

a. Desarrollo relativo del perfil (DRP)

Diferentes investigadores coinciden en afirmar que las tendencias del cambio de los valores de DRP con la profundidad se dirigen hacia la disminución en los suelos más jóvenes, por lo que, generalmente, los horizontes A poseen un mayor grado de desarrollo dentro del perfil (Meixner y Singer, 1980; Birkeland, 1984; Bierkeland et al., 1991). Sin embargo, en los suelos más antiguos, esta tendencia es diferente, ya que los valores más altos de DRP, se encuentran en los horizontes B (Bilzi y Ciolkosz, 1977; Meixner y Singer, 1980).

En este trabajo, los valores de desarrollo relativo del perfil disminuyen con la profundidad, aunque en los suelos Typic Eutrochrept (perfil Tal), Lithic Udivitrand (perfil 14), Eutric Hapludand (perfil 2), Typic Hapludand (perfiles 3, Jal y 16) la tendencia no fue tan clara en los horizontes B; Bw; B_{21}, B_{22}; B_{21}; y B_2, (Figs. 3a, 5a, 11a, 12a, 13a, 14a, y 15a, anexo II). Esto se debe al hecho de que estos horizontes se han desarrollado más, como consecuencia de la acción de los

factores formadores locales. De hecho, a excepción de los suelos Typic Eutrochrept (perfil Tal) y Lithic Udivitrand (perfil 14), el mayor desarrollo del horizonte B se observa mejor en los perfiles más evolucionados. Por su parte, el cambio del valor de DRP de los horizontes A y B de los suelos Typic Ustorthent (perfil Tall), Typic Udivitrand (perfil Si3) y Typic Hapludand (perfiles Si1 y Si2) muestran un comportamiento prácticamente lineal, caracterizado por una recta de pendiente negativa (Figs. 2a, 7a, 9a, 10a, anexo II). Se considera que los horizontes A se forman rápidamente, alcanzando un estado de cuasi-equilibrio en corto tiempo, mientras que los horizontes B requieren más tiempo para desarrollarse (Birkeland, 1984; Duchaufour, 1984; Shoji et al., 1993). Así, las tendencias de cambio en los valores de DRP descritas son muy similares a las encontradas por diversos autores (Bilzi y Ciolkosz, 1977; Meixner y Singer, 1980; Birkeland, 1984; Birkeland et al., 1991).

5.1.2 Propiedades físicas

a. Contenido de grava, arena, limo y arcilla

Las tendencias de cambio del contenido de las partículas de arena en suelos derivados de materiales aluviales y coluviales muestran una disminución con la profundidad con un relativo aumento en el contenido de limo y arcilla (Hoover y Ciolkosz, 1988). Sin embargo, en muchos de estos suelos estas tendencias son muy irregulares, como consecuencia de la heterogeneidad que muestra el material parental. En suelos derivados de materiales volcánicos, en donde también podría presentarse este tipo de comportamiento irregular del contenido de materiales de tamaño arena, limo y arcilla con la profundidad, a causa de diferencias texturales de los depósitos, en diversos trabajos se reporta una tendencia hacia la disminución del contenido de arena, con un aumento, en el porcentaje de limo y arcilla hacia los horizontes subsuperficiales (Tejedor et al., 1985; Miura et al., 1988; Shoji et al., 1990).

En los Andisoles la determinación precisa de la textura del suelo por medio de los análisis mecánicos comunes es problemática, por lo que se requiere de la aplicación de pretratamientos especiales para lograr una dispersión máxima de las pseudopartículas. Los suelos que no reciben estos pretratamientos sufren una subestimación en el contenido real de partículas de tamaño arcilla y limo. Por esta razón, en el presente trabajo, donde además se tomaron datos analizados por diferentes autores, se decidió tomar las fracciones acumuladas de grava+arena y limo+arcilla para disminuir los errores.

En este estudio, en los Vitrandic Udorthent (perfil Chis), Typic Ustorthent (perfil Tall), Typic Eutrochrept (perfil Tal), Typic Ustivitrand (perfil 63), Lithic Udivitrand (perfil 14), Typic Udivitrand (perfiles 3 y 16), el contenido de la fracción acumulada grava+arena aumentó y el material fino disminuyó en relación con la profundidad, (Figs. 1, 2, 3, 4, 5, 13 y 15, anexo II). En otros suelos, como en Typic Udivitrand (perfil Si3), Typic Hapludand (perfiles Si2 y Jal) y Eutric Hapludand (perfil 15), la

tendencia fue diferente, presentándose un cambio en el contenido de grava+arena con la profundidad que se ajustó a una regresión lineal de pendiente negativa y el contenido de limo+arcilla se ajustó, respectivamente, a una recta de pendiente positiva (Figs.7, 10, 11 y 14, anexo II). En el resto de los suelos estudiados, ambas fracciones acumuladas no mostraron un comportamiento lineal con la profundidad.

De lo anterior se desprende que en los suelos con menor grado de desarrollo, el contenido de grava + arena se incrementó con la profundidad, lo que provocó la disminución de limo+arcilla, mientras que en los suelos con mayor evolución, la tendencia se revierte y es similar a la reportada por diferentes investigadores (Tejedor et al., 1985; Miura et al., 1988; Shoji et al., 1990).

b. Estabilidad de la estructura (Est)

La estabilidad de la estructura refleja la resistencia de los agregados del suelo a la desintegración, ya sea por influencia del agua o por cualquier otro efecto mecánico (Baver et al., 1973). La tendencia que se reporta para los valores de estabilidad en Andisoles, en relación con la profundidad, refleja que los horizontes con mayor estabilidad estructural son los horizontes húmicos (A), en los suelos con menor desarrollo, mientras que aquéllos con mayor evolución, adquieren mayor estabilidad en los horizontes B (Miura et al., 1988; Shoji et al., 1990)

El cambio de los valores de la estabilidad de la estructura en relación con la profundidad llevan una tendencia muy similar en la mayoría de los suelos estudiados, siguiendo una recta horizontal, de pendiente cercana a cero, sobre todo en aquéllos de desarrollo incipiente (Vitrandic Udorthent (perfil Chis), Typic Usthortent (perfil Tall), Typic Ustochrept (perfil Tal), Typic Ustivitrand (perfil 63), Lithic Udivitrand (perfil 14) y Typic Udivitrand (perfil 6; Figs. 1a, 2a, 3a, 4a, 5a, 6a, anexo II). En dos perfiles de desarrollo moderado Typic Udivitrand (perfil Si3) y Typic Fulvudan (perfil 110), se observó una tendencia de ligero aumento del valor de estabilidad de la estructura con respecto a la profundidad (Figs. 7a y 8a, anexo II); mientras que en el resto de los suelos se presenta un pequeño incremento con la profundidad, de A a B, disminuyendo en C (Figs. 9a, 10a, 11a, 12a, 13a, 14a, 15a, anexo II). En el caso de los Andisoles, lo anterior refleja que a medida que los perfiles son más desarrollados, la estabilidad estructural de los horizontes A es mayor, como resultado del progreso de la edafogénesis a través del tiempo, que propicia la estabilidad de los agregados por humus o por compuestos de hierro (Nanzyo et al., 1993).

c. Densidad aparente

La densidad aparente (DA) es una propiedad diagnóstica de los Andisoles con valores menores que 0.9 g/cm^3. En investigaciones realizadas por diferentes autores en suelos de origen volcánico, se destaca que este valor tiende a disminuir con la profundidad (Uehara, 1980; Wada, 1985; Parfitt, 1985): Sin embargo, en otros trabajos, la densidad aparente muestra los valores más bajos

en los horizontes superficiales, aumentando con la profundidad (Saigusa y Shoji, 1986; Shoji et al., 1987; Shoji et al., 1990).

En la presente investigación, la tendencia del cambio en la densidad aparente con la profundidad mostró una tendencia lineal, con pendiente positiva en los suelos Vitrandic Udorthent (perfil Chis), Typic Usthortent (perfil Tall), Lithic Udivitrand (perfil 14) y Typic Hapludand (perfiles Si2, horizontes A a C_1, y 15; Figs. 1b, 2b, 5b, 10b, 11b, anexo II) y una linealidad no tan marcada en los suelos Typic Fulvudand (perfil 110), Eutric Hapludand (perfil 2) y Typic Hapludand (perfil 3; Figs. 8b, 12b y 13b, anexo II). En el resto de los perfiles no se aprecia un comportamiento regular en la variación del valor de densidad aparente en relación a la profundidad. La tendencia de disminución de la variable en cuestión con la profundidad es debida a la presencia de materia orgánica en los horizontes superficiales, que les confiere una densidad aparente baja, y a la de minerales primarios, poco alterados, en los horizontes C, brindándoles una densidad aparente mayor. Asimismo, la transformación de dichos minerales a alofano produce una alta porosidad que implica una densidad aparente baja (Nanzyo et al., 1993).

c. Retención de humedad a 1500 kPa.

Los Andisoles tienden a retener una gran cantidad de agua en poros de diferentes tamaños. En las etapas tempranas de alteración de cenizas volcánicas, los suelos presentan valores bajos de retención de humedad (H_2O). Al progresar el intemperismo de los minerales primarios, se presenta un aumento en la capacidad de retención de agua, ya que ésta es retenida en los poros que dejan los minerales al alterarse (Wada, 1980; Warketin y Maeda, 1980) y por los minerales alofánicos, a causa de que su tamaño y estructura (fino y esferoidal) permiten el acomodo de las moléculas de agua en poros intra e inter esféricos (Nanzyo et al., 1993a).

En Andisoles de diferentes partes del mundo, el comportamiento que se observa es de disminución en los valores de retención de agua con la profundidad (Shoji et al., 1987; Shoji et al., 1990; McDaniel et al., 1992). No obstante en suelos de origen volcánico, policíclicos, los cambios de H_2O con la profundidad son muy irregulares (Shoji et al. op cit.). Por otro lado, en algunos Mollisoles y paleosuelos derivados de materiales volcánicos, se observa un incremento en el valor de la retención de agua al aumentar la profundidad del perfil (Tejedor-Selguero et al., 1985; Shoji et al., 1990). En Spodosoles el comportamiento de esta propiedad con la profundidad es muy irregular (McDaniel et al., 1992).

En este estudio, el cambio de los valores de la retención de agua a 1500 kPa con la profundidad en el Typic Ustorthent (perfil Tall) se mantiene constante (Fig. 3c, anexo II), de tal forma que la regresión lineal tiene una pendiente cercana a cero. En los suelos Vitrandic Udorthent (perfil Chis), Typic Ustivitrand (perfil 63), Lithic Udivitrand (perfil 14), Typic Udivitrand (perfil Si3), Typic Fulvudand (perfil 110), Typic Hapludand (perfiles Si1, Si2, Jal y 16) la tendencia de cambio en los valores

de retención de humedad es lineal, con una pendiente negativa (Figs. 1c, 4c, 5c, 7c, 8c, 9c, 10c, 14c y 15c, anexo II). Por su parte, en los suelos Typic Eutrochrept (perfil Tal), Eutric Hapludand (perfiles 15 y 2) y Tipic Hapludand (perfil 3; Figs. 3c, 11c, 12c, 13c, anexo II) no se observó un comportamiento regular, lo que no permitió establecer una relación entre esta propiedad y la profundidad.

5.1.3 Propiedades químicas

a. Materia orgánica

La acumulación de materia orgánica en los Andisoles representa un rasgo muy notable, ya que tiende a formar complejos muy estables con el aluminio y hierro activos y con el alofano y minerales semejantes (Wada, 1985). Los valores del contenido de materia orgánica disminuyen con la profundidad en los Andisoles de diferentes partes del mundo en perfiles monocíclicos (Quantin et al., 1985; Tejedor-Selguero et al., 1985; Miura et al., 1988; Nanzyo et al., 1993).

En esta investigación, las tendencias de cambio del contenido de materia orgánica con la profundidad presentan un comportamiento marcadamente lineal en los casos de los perfiles Vitrandic Udorthent (perfil Chis), Typic Ustortent (perfil Tall), Typic Ustivitrand (perfil 63), Lithic Udivitrand (perfil 14), Typic Udivitrand (perfil Si3) y Typic Hapludand (perfiles Si1 y Si2), Eutric Hapludand (perfiles 2 y 15) y Typic Hapludand (perfiles 3 y 16; Figs. 1c, 2c, 4c, 5c, 7c, 9c, 10c, 11c, 12c, 13c, 15c, anexo II), representada la regresión lineal por una pendiente negativa. Por su parte, en los suelos Typic Eutrochrept (perfil Tal), Typic Fulvudand (perfil 110) y Typic Hapludand (perfil Jal) no se observó un comportamiento regular de la variable en cuestión (Figs. 3c, 8c y 14c. anexo II).

b. pH delta.

El pH delta en suelos derivados de materiales volcánicos muestra, en general, una tendencia al aumento con la profundidad, que refleja el predominio de minerales de carga variable en la solución del suelo en los horizontes superficiales, mientras que a profundidad hay un predominio de los minerales primarios (Quantin et al., 1985; Van Wambeke, 1991; Shoji et al., 1991).

En la presente investigación, el cambio del pH delta se ajustó a una regresión lineal, con una pendiente cercana a cero en los suelos con menor desarrollo Vitrandic Udorthent (perfil Chis), Typic Usthortent (perfil Tall), Typic Eutrochrept (perfil Tal) y Typic Ustivitrand (perfil 63; Figs. 1a, 2a, 3a y 4a, anexo III), lo que evidencia que en la fase sólida del suelo no predominan las cargas variables, típicas para suelos volcánicos de mayor desarrollo (Van Wanbeke, 1991). Los suelos Lithic Udivitrand (perfil 14) y Typic Udivitrand (perfil Si3) muestran una

tendencia de cambio lineal con pendiente positiva (Figs. 5a y 7a, anexo III). Ambos perfiles mencionados representan suelos con bajo grado de evolución, aunque el ligero aumento en los valores del pH delta con la profundidad refleja una mayor proporción de los minerales de carga variable en los horizontes superficiales. Los cambios de la misma propiedad en discusión en los suelos Typic Hapludand (perfil Si2) y Eutric Hapludand (perfiles 2 y 15 horizontes B-C) pueden ser representados por una recta de pendiente negativa, que implica disminución de los valores de pH delta con la profundidad, lo que comprueba la hipótesis de una mayor evolución en los horizontes subsuperficiales (Figs. 10a, 11a, 12a, anexo III). El valor de ph delta en los suelos Typic Fulvudand (perfil 110), Typic Hapludand (perfiles Si1 y Jal) no muestra el comportamiento lineal (Figs. 8a, 9a, 14a, anexo III), lo que no permitió establecer una relación entre esta propiedad y la profundidad. Finalmente, en los suelos Typic Hapludand (perfiles 3 y 16), la variable de interés se ajusta a una recta de pendiente cercana a cero, que parece reflejar las etapas más evolucionadas del desarrollo de los suelos, lo que se puede tomar como indicio de que el sistema se encuentra en el estado de cuasi-equilibrio, por lo que no se detectan los cambios (Figs. 12a y 15a, anexo III; Van Wanbeke, 1991).

c. pH medido en NaF.

Según la bibliografía, el valor de pH medido en NaF no parece poseer una tendencia de cambio bien definida con respecto a la profundidad en los suelos derivados de materiales volcánicos. En algunos suelos esta propiedad muestra un aumento, en otros una disminución y en otros más no tiene ninguna relación con la profundidad (Quantin et al., 1985; Mc Daniel et al., 1992)

En esta investigación, las tendencias de cambio del valor de pH medido en NaF no son lineales para los perfiles Typic Usthortent (perfil Tall), Typic Eutrochrept (perfil Tal), Typic Fulvudand (perfil 110), Eutric Hapludand (perfil 2) y Typic Hapludand (perfil 3; Figs. 2a, 3a, 8a, 12a y 13a, anexo III); mientras que en los perfiles Vitrandic Udorthent (perfil Chis) y Lithic Udivitrand (perfil 14) se ajustaron a una regresión lineal de pendiente negativa. En el perfil Typic Ustivitrand (perfil 63), la recta que representa la regresión lineal posee una pendiente positiva, a pesar de ser un suelo poco desarrollado, por lo que se esperaría una pendiente negativa (Figs. 1a, 4a y 5a, anexo III).

d. Retención de fosfatos

La retención de fosfatos es una propiedad diagnóstica en Andisoles, cuyo valor disminuye con la profundidad, de acuerdo con los trabajos de Radcliffe y Gilman, 1985; Quantin et al., 1985; Miura et al., 1988 y McDaniel et al., 1992. En suelos pertenecientes a otros órdenes (Mollisoles, Spodosoles) esta tendencia de disminución no se observa (Shoji et al., 1990; McDaniel et al., 1992).

La retención de fosfatos en los suelos de bajo y moderado desarrollo disminuye con la profundidad, ajustándose a una regresión lineal, con una pendiente

negativa en los Vitrandic Udorthent (perfil Chis), Typic Ustortent (perfil Tall), Typic Eutrochrept (perfil Tal), Typic Ustivitrand (perfil 63), Typic Udivitrand (perfil Si3) y Typic Hapludand (perfiles Si1 y Si2; Figs. 1b, 2b, 3b, 4b, 6b, 7b, 9b, 10 b, anexo III); con excepción de los suelos Lithic Udivitrand (perfil 14) y Typic Fulvudand (perfil 110; Fig. 5b y 8b anexo III). Los suelos de mayor desarrollo no muestran un comportamiento lineal, aunque el hecho de la disminución de la retención de fosfatos con la profundidad se mantiene en casi todos los casos analizados (Figs. 13b, 14b y 15b, anexo III). Todo lo contrario se observa en los suelos Eutric Hapludand (perfiles 15 y 2; Figs. 11b y 12 b, anexo III), que representan suelos con características eútricas, a causa de que el alto contenido de bases en el horizonte B, controla la fijación de fósforo (Shoji et al., 1993b).

e. Capacidad de intercambio catiónico (CIC).

Según las investigaciones realizadas hasta el momento, los valores de CIC en relación a la profundidad muestran diferentes tendencias reportadas por diferentes autores en suelos derivados de materiales volcánicos. En algunos trabajos se reporta un aumento del valor de CIC con la profundidad (Radcliffe y Gillman, 1985; Miura et al., 1988); mientras que en otros, la tendencia es diferente, registrándose una disminución en el valor de CIC con la profundidad (Radcliffe y Gillman, 1985; Quantin et al., 1985; Shoji et al., 1990; Mc Daniel et al., 1992).

Por su parte en este trabajo, la capacidad de intercambio catiónico mostró un comportamiento lineal en los suelos Typic Ustivitrand (perfil 63), Lithic Udivitrand (perfil 14) y Typic Udivitrand (perfil Si3), Typic Hapludand (perfil Si1; Figs. 4c, 5c, 7c, 9c, anexo III), donde su valor disminuyó con la profundidad, ajustándose a una pendiente negativa. En los suelos de bajo y moderado desarrollo no se observó un comportamiento lineal, como en los Vitrandic Udorthent (perfil Chis), Typic Usthortent (perfil Tall), Typic Eutrochrept (perfil Tal), Typic Fulvudand (perfil 110), Typic Hapludand (perfil Si2), Eutric Hapludand (perfiles 15, y 2; Figs. 1c, 2c, 3c, 8c, 9c, 11c y 12c, anexo III).

5.1.4 Índices de intemperismo

a. Relación sílice/aluminio y relación sílice/sesquióxidos

Los valores de ambas relaciones en Andisoles disminuyen conforme progresa el intemperismo, dado que el sílice tiende a perderse más rápidamente que los sesquióxidos, y se permite que el aluminio activo controle algunas de las propiedades como son la retención de fosfatos y la acumulación de materia orgánica (Van Wambeke, 1991).

Las tendencias de cambio de los valores de la relación sílice/aluminio y sílice/sesquióxidos en suelos derivados de diferentes materiales parentales, como coluviones y aluviones no se encuentra bien definida, ya que en algunos suelos la tendencia es de aumento con la profundidad, mientras que en otros es de

disminución (Quantin et al., 1985; Evans y Chessworth, 1985; Miura et al., 1988). En suelos que proceden de materiales volcánicos, el cambio en el valor de ambos índices es de aumento con la profundidad, según los datos aportados por Birkeland, 1984; Uehara, 1985 y Miura et al., 1988.

En cuanto a los cambios detectados en los índices de intemperismo y estimados a partir de la relación sílice/aluminio y sílice/sesquióxidos en el presente trabajo, se observó una tendencia lineal, similar, de pendiente positiva en los horizontes superficiales, con un rompimiento de pendiente de la regresión que se presentó en los horizontes C, Cw y las capas de material volcánico en los suelos Vitrandic Udorthent (perfil Chis), Typic Ustivitrand (perfil 63), Lithic Udivitrand (perfil 14) y Eutric Hapludand (perfiles 15 y 2; Figs. 1a, 3a, 4a, 6a y 7a, anexo IV). Sin embargo, en los suelos más desarrollados, Typic Hapludand (perfiles 3, Jal y 16; Figs. 8a, 9a y 10a, anexo IV), la regresión tuvo una pendiente muy cercana a cero, lo que indica un mayor equilibrio de sistemas, con pocos cambios en cuanto al contenido de sílice y sesquióxidos. De hecho es conocido que ambas relaciones muestran una disminución al progresar el intemperismo y al perder el suelo gran parte de sus cargas, con procesos que coinciden con los bajos contenidos de cationes en el suelo y con valores de pH neutros a ácidos (Birkeland, 1984, Van Wanbeke, 1991).

b. Relación hierro/sílice

Esta relación depende del contenido de minerales amorfos y marca la diferencia entre los amorfos silicatados y los amorfos de hierro. El valor es pequeño cuando se trata de suelos jóvenes poco desarrollados con pequeñas cantidades de alofano (cercana a cero), mientras que un valor de 0.4 implica que se tiene un 40% de amorfos de hierro (Yong et al., 1992). Los datos aportados en diferentes investigaciones para este índice revelan una tendencia de cambio hacia la disminución con la profundidad (Ugolini et al., 1988; Yong et al., 1992).

En este estudio, la relación hierro/sílice en todos los suelos disminuye con la profundidad (Figs. 1a, 4a, 5a, 6a, 7a, 8a, 9a, 10a, anexo IV), reflejando un mayor intemperismo de los horizontes superficiales lo que a su vez coincide con una mayor producción de amorfos de hierro que de sílice (Yong et al., 1992).

c. Índices bases y lixiviación

El índice de lixiviación, en general, determina los cambios que ha sufrido un suelo en relación al material parental, por lo que sus valores más pequeños son propios para los horizontes superficiales (Colman, 1980). El cambio del valor tanto del índice de lixiviación como el de bases con la profundidad, que se reporta en la literatura, es de disminución (Birkeland, 1984; Miura et al., 1988).

En algunos de los suelos estudiados, tanto el índice bases como el de lixiviación poseen un comportamiento semejante, que se ajusta a una regresión lineal, con

pendiente cercana a cero (en los horizontes A y B) o positiva (C y R; Vitrandic Udorthent (perfil Chis), Typic Ustivitrand (perfil 63), Lithic Udivitrand (perfil 14), Typic Fulvudan (perfil 110), Eutric Hapludand (perfil 15) y Typic Hapludand (perfiles Jal y 16; Figs. 1a, 3a, 4a, 5a, 6a, 9a y 10a, anexo IV). Un Typic Hapludand que posee características dístricas (perfil 3), presentó una disminución en ambos índices con la profundidad, cambio que se ajustó a una recta con pendiente positiva (Fig. 8a, anexo IV), mientras que en el Eutric Hapludand (perfil 2), el comportamiento fue no lineal (Fig. 7a, anexo IV).

d. Índice de Parker

El valor de este índice disminuye a medida que se pierden las bases del perfil. Por lo mismo, los valores altos reflejan etapas iniciales de desarrollo, mientras que los valores bajos implican que la mayor parte de los cationes se han perdido y ha actuado un intemperismo intenso en los suelos (Colman, 1980).

Algunos suelos derivados de materiales volcánicos en el mundo poseen valores altos en los horizontes superficiales que disminuyen con la profundidad, sobre todo en aquellos suelos con propiedades dístricas (Miura et al., 1988). Sin embargo, en otros suelos la tendencia de cambio en el valor del índice de Parker es irregular, lo que refleja un mayor intemperismo de ciertos horizontes del suelo en relación con el material parental, tal como lo revelan los estudios realizados por Ugolini et al., 1988; Miura et al., 1988; Shoji et al., 1990.

En este estudio, en los cambios del índice de Parker con la profundidad se observó un comportamiento irregular en los suelos Vitrandic Udorthent (perfil Chis), Lithic Udivitrand (perfil 14), Eutric Hapludand (perfiles 15 y 2; Figs. 1b, 4b, 6b y 7b, anexo IV); en los suelos Typic Hapludand (perfiles 3 y Jal) la tendencia fue lineal con pendiente positiva (Figs. 8b y 9b, anexo IV); y en el Typic Hapludand (perfil 16) el cambio del índice de Parker con la profundidad fue lineal con una pendiente cercana a cero (Fig.10b, anexo IV). Este comportamiento irregular del índice en cuestión se explica al relacionarlo con el contenido de bases de los suelos estudiados, por lo que en los sistemas con características eútricas, el valor del índice mencionado va a aumentar con la profundidad en los horizontes de acumulación; mientras que en aquéllos con propiedades dístricas, donde predominan los procesos de lixiviación, el valor del índice de Parker disminuye linealmente con la profundidad, como consecuencia de un decremento progresivo del contenido de bases en el horizonte B.

5.1.5 Balances geoquímicos

Al realizar un balance geoquímico, lo que se quiere es tener una medida de comparación entre el material parental y el suelo, a través del cálculo de pérdidas y ganancias relativas de elementos que ha habido en el perfil, como consecuencia de procesos pedogenéticos tomando como base un elemento estable, que en este caso es el aluminio (Krauskopf, 1979). Los cambios que se dan en el contenido de

elementos con respecto a la profundidad refleja un comportamiento irregular en diferentes suelos, a causa de que los procesos pedogenéticos son muy variados y de que no existe una sóla dirección en los mismos (Hetier, 1975; Millot et al., 1976; Johnson et al., 1990).

En esta investigación, en cuanto al cambio del contenido de bases con la profundidad, se observó una tendencia lineal con una pendiente negativa en los suelos Vitrandic Udorthent (perfil Chis), Lithic Udivitrand (perfil 14), y Typic Hapludand (perfiles 3 y Jal; Figs. 1, 3, 6 y 7, anexo V). En los suelos Eutric Hapludand (perfiles 15 y 2; Figs. 4 y 5, anexo V), la tendencia es inversa, observándose un aumento en el contenido de bases con la profundidad. En el Typic Hapludand correspondiente con el perfil 16, la tendencia de cambio se ajustó a una regresión lineal con pendiente cercana a cero. Por lo que respecta al cambio en el contenido de Fe_2O_3 con la profundidad, se ajustó a una regresión lineal con pendiente negativa en los suelos Eutric Hapludand (perfil 2) y Typic Hapludand (perfiles 3 y 16); a una regresión lineal de pendiente cercana a cero en el Eutic Hapludand (perfil 15); y a una regresión lineal con pendiente positiva en en el Typic Hapludand (perfil Jal). En el resto de los suelos la tendencia de cambio no fue lineal.

En relación a las pérdidas y ganancias de SiO_2 y TiO_2 (los cuales siguieron un comportamiento semejante) con respecto a la profundidad, no se manifestó un cambio notorio, de tal forma que la tendencia de cambio fue de tipo lineal con pendiente cercana a cero en los suelos Lithic Udivitrand (perfil 14), Eutric Hapludand (perfiles 15 y 2), Typic Hapludand (perfiles 3, Jal y 16; Figs. 3, 4, 5, 6, 7, 8, anexo IV). En el suelo Vitrandic Udorthent (perfil Chis), las pérdidas y ganacias de estos dos óxidos a lo largo del perfil no mostraron un comportamiento homogéneo (Fig. 1, anexo V).

Si bien los valores de las propiedades edafomorfológicas, físicas, químicas, índices de intemperismo y balances geoquímicos no siguen en su totalidad un comportamiento lineal con respecto a la profundidad, se optó por presentar un modelo lineal, debido a que la mayoría de ellas sí muestran esta tendencia, sobre todo si se considera las primeras etapas del desarrollo de suelos. Claro está que el modelo lineal arrojará un error mayor porque en algunos casos las propiedades tienen un comportamiento exponencial, asintótico; pero como en esta investigación se plantea modelar de la manera más simple y sencilla, la opción es válida, ya que sí ilustra ampliamente la tendencia evolutiva que siguen los suelos.

5.2 Selección de propiedades e índices

La selección de las propiedades que se utilizaron en el modelo, se realizó por medio de un análisis de regresión lineal simple entre todas las características señaladas. El objetivo de este análisis de regresión, consistió en determinar el grado de dependencia o correlación existente entre las propiedades e índices, de tal manera que se pudieran eliminar algunas y trabajar con el menor número de

variables posible. El contar con pocas variables en el modelo simplifica el trabajo de interpretación y análisis, porque facilita su comprensión y aplicabilidad. Asimismo, el uso de pocas variables, que sean representativas del fenómeno que se modela, reduce los costos, ya que se limita el número de análisis de laboratorio.

La dependencia lineal entre dos variables aleatorias es claramente observable cuando al crecer o decrecer una de ellas, la otra cambia, de manera proporcional. Matemáticamente, para evaluar la dependencia entre las variables se utilizan las llamadas medidas de dispersión, entre las que destacan la covarianza y el coeficiente simple de correlación lineal.

La covarianza de Y_1 y Y_2 se define como el valor esperado de $(Y_1-\mu_1)(Y_2-\mu_2)$, que en términos matemáticos se escribe de la siguiente manera:

$$COV(Y_1,Y_2)= E[(Y_1-\mu_1)(Y_2-\mu_2)]$$

donde $\mu_1=E(Y_1)$ y $\mu 2=E(Y_2)$, tal que a mayor valor absoluto de la covarianza de Y_1 y Y_2 corresponde una mayor dependencia lineal entre ambas. Desafortunadamente, es difícil emplear a la coverianza como una medida de la dependencia, porque su valor depende de la escala de medición y por consiguiente es difícil determinar si una covarianza es grande a simple vista (Mendenhall et al., 1986). Este problema se puede eliminar, al estandarizar su valor, por medio del coeficiente de correlación lineal de la población, el cual se relaciona con la covarianza de la siguiente forma:

$$R^2=COV\,(Y_1,Y_2)/\sigma_1\sigma_2$$

donde $\sigma_1\sigma_2$ son las desviaciones estándar de Y_1 y Y_2 respectivamente. Este coeficiente posee valores que se encuentran en el intervalo [-1,1]. Un valor cero del coeficiente implica una correlación nula y por el contrario, un valor de 1 o -1 señala una correlación perfecta. Por otro lado, un coeficiente de signo negativo indica que Y_2 decrece cuando Y_1 crece; y uno positivo, que Y_2 crece cuando Y_1 crece.

Para este trabajo se consideró que valores mayores que 0.75 eran altos, de acuerdo a los criterios establecidos por Mendenhall et al. (op cit.).

5.2.1 Correlación entre las propiedades morfoedáficas y las propiedades físicas

El análisis de correlación entre las propiedades físicas y morfoedáficas, mencionadas en los puntos anteriores -fracción acumulado limo+arcilla, (Li+arc) densidad aparente (DA), retención de humedad (H_2O), estabilidad de la estructura (Est) y desarrollo relativo del perfil (DRP)- se realizó de tal manera que se pudiera observar si existe la dependencia lineal entre dos de ellas. Así, se tomaron los valores de una de las propiedades, por ejemplo DRP, y se hizo la regresión lineal

simple con cada una de las otras propiedades. Cabe señalar que si bien la materia orgánica (MO) no es una propiedad física sino química, se analizó con las propiedades físicas y el DRP, ya que se correlaciona fuertemente con algunas de ellas, como la densidad aparente y la retención de agua, tal como lo indican las investigaciones realizadas por Nanzyo et al. (1993), Shoji et al. (1991, 1993a y b).

Los coeficientes de correlación lineal simple obtenidos en la presente investigación se muestran en la tabla 5.1. De este análisis se observa que en los perfiles que se encuentran en los extremos de desarrollo (máximo y mínimo) como son el Vitrandic Udorthent y Typic Hapludand, se observan los valores más altos de correlación entre las variables de interés; esto se debe, quizá, a que tanto en las cenizas poco alteradas como en los suelos más desarrollados, los materiales son más homogéneos, lo que redunda en una alta dependencia entre las propiedades.

En el caso del análisis de la correlación entre DRP y DA, en 7 de los perfiles considerados, los valores de R^2 fueron mayores que 75%, mientras que la correlación entre DRP y H_2O arrojó coeficientes de correlación con valores de más de 0.75 en 6 de los suelos estudiados y la correlación entre DRP y Est fue alta en 9 de ellos. Los valores obtenidos de R^2 para la correlación lineal entre DRP y la fracción acumulada li+arc fue mayor que 0.75 en 10 de los suelos estudiados.

Por su parte, la correlación entre DA y MO fue mayor que 75% en 9 de los suelos investigados, mostrando valores bajos de R^2 en la mayor parte de los mismos en la correlación con las otras propiedades (H_2O, Est, Li+arc). La capacidad de retención de humedad de los suelos estudiados mostró valores altos de correlación únicamente con MO (mayores que 75%). La estabilidad de la estructura, no tuvo una buena correlación con DA y H_2O, pero sí con DRP, MO y li+arc, cuyos valores de correlación resultaron altos en 9, 8 y 8 de los suelos estudiados, respectivamente.

De acuerdo al análisis anterior, se consideró tomar en cuenta las variables que tuvieran valores bajos de correlación entre sí en, por lo menos, la mitad de los suelos estudiados, de tal forma que se les asignó un valor bajo de correlación. De esta forma se construyó una matriz de correlación con los valores asignados y se seleccionaron las variables que mostraron el menor número de valores altos de correlación: DRP. DA, Li+arc y H_2O (tabla 5.2).

5.2.2 Correlación entre las propiedades químicas

Las propiedades químicas consideradas para este análisis fueron la retención de fosfatos (Pret), el pH delta (pHd), la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y el pH medido en NaF (pHN), cuyos coeficientes de correlación se muestran en la tabla 5.3.

Tabla 5.1. Valores del coeficiente de correlación R^2 para las propiedades físicas y morfológicas

Perfil	DRP/DA	DRP/ H_2O	DRP/Est	DRP/MO	DRP/ Li+arc	DA/ H_2O	DA/Est	DA/MO
Chis	-1.00	0.99	0.57	0.99	0.95	0.99	-0.57	-0.99
Tall	0.91	0.07	0.93	0.81	0.95	0.00	0.99	0.86
Tal	0.83	0.61	0.77	0.04	0.94	0.21	0.69	0.33
63	0.21	0.51	0.80	0.45	0.87	0.09	0.00	0.13
14	-0.51	0.74	0.99	0.44	0.87	-0.96	-0.63	-1.00
Si3	0.37	0.99	0.91	0.57	0.96	0.47	0.11	0.96
110	0.88	0.74	0.87	0.66	0.01	0.92	0.72	0.86
Si1	0.97	0.49	0.01	0.89	0.87	0.04	0.11	0.89
Si2	0.00	0.73	0.73	0.88	0.85	0.95	0.70	0.00
15	-0.60	0.99	0.98	0.57	0.94	-0.48	-0.70	-0.93
2	-0.87	0.87	0.36	0.70	0.09	-0.71	0.10	-0.95
3	-0.54	0.68	0.28	0.38	0.19	-0.69	-0.98	-0.91
Jal	0.46	0.96	0.20	0.74	0.41	0.67	0.01	0.07
16	-0.99	0.99	0.91	0.77	0.94	-0.97	-0.92	-0.72

Perfil	DA/ Li+arc	H_2O /Est	H_2O /MO	H_2O/li+arc	Est/MO	Lim+arc/Est	Li+arc/MO
Chis	0.95	0.44	0.93	0.99	0.45	0.54	0.87
Tall	0.59	0.00	0.02	0.01	0.88	0.99	0.30
Tal	0.64	0.77	0.21	0.03	0.80	0.48	0.30
63	0.48	0.60	1.00	0.01	0.87	0.99	0.79
14	0.87	0.93	0.74	0.71	0.56	0.99	0.45
Si3	0.50	0.04	0.67	0.99	0.27	0.83	0.68
110	0.09	0.52	0.94	0.00	0.87	0.97	0.30
Si1	0.01	0.00	0.93	0.74	0.84	0.99	0.79
Si2	0.66	0.48	0.91	0.59	0.54	0.62	0.87
15	0.57	0.94	0.48	0.87	0.61	0.47	0.48
2	0.03	0.57	0.53	0.20	-0.31	0.30	0.20
3	0.97	0.66	0.58	0.99	0.97	0.90	0.37
Jal	0.58	0.23	0.69	0.70	0.80	0.12	0.88
16	0.99	0.92	0.83	0.97	0.86	0.85	0.48

Tabla 5.2. Matriz de correlación que muestra el grado de dependencia entre las variables consideradas

	DRP	DA	Est	MO	Li+arc	H_2O
DRP		Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo
DA	Bajo		Bajo	Alto	Bajo	Bajo
Est	Alto	Bajo		Alto	Alto	Bajo
MO	Bajo	Alto	Alto		Bajo	Alto
Li+arc	Alto	Bajo	Alto	Bajo		Bajo
H_2O	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	

De acuerdo a los valores señalados, se puede observar que pHd en relación con Pret mostró valores muy bajos de correlación en 11 de los 13 suelos estudiados,

mientras que para CIC los valores de R^2 fueron mayores que 0.75 en 4 de los perfiles. La correlación entre pHd y pHN fue alta en sólo 2 de los casos analizados.

Los valores de correlación entre Pret y CIC resultaron altos en 5 de los 15 suelos estudiados, y entre Pret y pHN fueron mayores que 0.75 en 4 de 10 perfiles.

Por su parte, CIC y pHN arrojaron valores altos de correlación en 6 de 10 suelos.

Tabla 5.3. Valores de R^2 para las propiedades químicas

Perfil	pHd/Pret	pHd/CIC	pHd/pHN	Pret/CIC	Pret/pHN	CIC/pHN
Chis	0.71	0.65	0.79	0.89	0.96	0.98
Tall	0.40	0.40	0.49	0.27	0.82	0.33
Tal	0.75	0.99	1.00	0.64	0.41	0.99
63	0.72	0.39	0.62	0.89	0.99	0.80
14	-0.50	-0.95	-0.87	0.21	0.00	0.98
Sl3	0.97	1.00		0.94		
110	0.00	0.02	0.00	0.95	0.70	0.82
Sl1	0.19	0.55		0.62		
Sl2	0.50	0.11		0.26		
15	-0.66	0.88	0.19	-0.49	-0.55	0.45
2	-0.46	0.69	0.65	-0.09	0.00	0.98
3	0.58	0.48	0.34	0.87	0.82	0.73
16	0.25	0.36	0.17	0.50	0.99	0.37

Al igual que en el análisis de los coeficientes de correlación de las propiedades físicas, se construyó la matriz de correlación con los valores asignados (bajos y altos) y se seleccionaron las variables que mostraron la menor correlación posible y que fueron: pHd, Pret, CIC (tabla 5.4).

Tabla 5.4. Matriz de correlación que muestra el grado de dependencia entre las variables consideradas (propiedades químicas)

	pHd	Pret	CIC	pHN
pHd		Bajo	Bajo	Bajo
Pret	Bajo		Bajo	Bajo
CIC	Alto	Bajo		Alto
pHN	Bajo	Bajo	Alto	

5.2.3 Correlación entre los índices de intemperismo

Los índices de intemperismo considerados son: las relaciones sílice/aluminio (Sa), sílice/sesquióxidos (Ses), bases (Bas), el índice de lixiviación (Lix), el de Parker (Par) y la relación hierro/ sílice (Fes), cuyos valores de correlación obtenidos se muestran en la tabla 5.6*.

Los valores del coeficiente de correlación entre las relaciones Sa y Ses son muy altos en 7 de 8 de los suelos estudiados. Por su parte, los valores de R^2 entre Sa y Bas, Sa y Par, Sa y Lix, Sa y Fes son bajos en la mayor parte de los perfiles considerados.

Los valores de R^2 obtenidos para Ses y Bas, Ses y Par, son bajos (menores que 0.75) en casi todos los suelos investigados, y entre Ses y Lix, Ses y Fes son altos en 6 de los perfiles analizados.

La correlación lineal entre Bas y Par arrojó valores altos de R^2 para todos los suelos investigados, y entre Bas y lix se obtuvieron valores mayores que 0.75 para 5 de los 8 perfiles. Sin embargo, los valores obtenidos entre Bas y el resto de las variables fueron bajos en casi todos los suelos.

En la correlación entre los índices de Parker y de lixiviación, los valores de R^2 fueron altos para 5 de los suelos, mientras que los obtenidos para Par y Fes fueron bajos en la mayor parte de los perfiles.

Por lo que respecta a la correlación entre Lix y Fes, los valores del coeficiente de correlación resultaron altos para 6 de los suelos analizados.

De acuerdo a lo anterior y considerando el grado de correlación entre los diferentes índices, se ha construído la matriz de correlación que expresa la dependencia lineal, cualitativa entre ellos (tabla 5.6). De esta forma, se seleccionaron tales propiedades como la relación sílice/aluminio, el índice de Parker y la relación hierro/sílice para el modelo.

Tabla 5.5 Valores de R^2 para los índices de intemperismo

Perfil	Sa/Ses	Sa/Bas	Sa/Par	Sa/Lix	Sa/Fes	Ses/Bas	Ses/Par	Ses/Lix	Ses/Fes
Chis	1.00	0.90	0.98	0.57	0.22	0.94	0.97	0.78	0.82
Tala	1.00	0.37	0.15	0.20	0.49	0.35	0.30	0.82	0.79
14	0.99	0.25	0.03	1.00	0.66	0.16	0.23	0.92	0.66
15	0.99	0.07	0.04	1.00	0.99	0.03	0.03	0.82	0.99
2	0.96	0.78	0.71	0.01	0.70	0.67	0.69	0.15	0.75
3	0.27	0.18	0.14	0.18	0.08	0.98	0.40	0.79	0.88
Jal	0.77	0.00	0.02	0.08	0.00	0.27	0.04	0.04	0.00
16	1.00	1.00	0.99	1.00	0.91	0.99	0.99	0.99	0.91

Tabla 5.5 (continuación)

Perfil	Bas/Par	Bas/Lix	Bas/Fes	Par/Lix	Par/Fes	Lix/Fes
Chis	0.97	0.97	0.90	0.78	0.22	0.90
Tala	1.00	0.80	0.30	0.82	0.49	0.87
14	0.83	1.00	0.59	0.02	0.36	0.25
15	0.83	1.00	0.19	0.02	0.49	0.97
2	0.89	0.01	0.16	0.15	0.70	0.78
3	1.00	0.18	0.27	0.99	0.08	0.78
Jal	0.94	0.08	0.57	0.94	0.00	0.30
16	0.99	1.00	0.90	0.99	0.91	1.00

Tabla 5.6. Matriz de correlación que muestra el grado de dependencia entre las variables consideradas (índices de intemperismo)

	Sa	Ses	Bas	Par	Lix	Fes
Sa		Alta	Baja	Baja	Baja	Baja
Ses	Alta		Baja	Baja	Baja	Alta
Bas	Baja	Baja		Alta	Alta	Baja
Par	Baja	Baja	Alta		Baja	Baja
Lix	Baja	Alta	Alta	Baja		Alta
Fes	Baja	Alta	Baja	Baja	Baja	

5.3 Secuencia de evolución teórica de los perfiles analizados y su relación con propiedades e índices

Para caracterizar mejor las propiedades elegidas y trabajar con los perfiles completos y no con cada horizonte, se ha realizado una ponderación de las mismas tomando un parámetro común a todas ellas: el espesor de cada horizonte del perfil, de acuerdo a la metodología establecida en el capítulo III. Los resultados de los valores de las propiedades e índices ponderados se presentan en las tablas 1, 2, 3, 4 y 5 (anexo VI).

Por otro lado, cada uno de los suelos investigados representa un estadio de desarrollo diferente. Así, y de acuerdo con las consideraciones referidas en la literatura donde se establecen los criterios evolutivos del orden Andisol (Parfitt et al., 1983; Wada, 1985; Saigusa et al., 1989; Shoji et al., 1993), se han ordenado a los suelos, de acuerdo al grado de desarrollo que cada uno presenta. De esta forma se consideró, serían más fácilmente observables las tendencias evolutivas de cada propiedad seleccionada.

Con esta base, el orden evolutivo, establecido es el siguiente:

Chis->Tall->Tal->63->14->6->Si3->110->Si1->Si2->15->2->3->Jal-> 16

que va desde los Entisoles hasta los Andisoles más desarrollados Vitrandic Udorthent->Typic Ustorthent->Typic Eutrochrept-> Typic Ustivitrand->Lithic Udivitrand-> Typic Udivitrand->Typic Fulvudand->Typic Hapludand->Typic Hapludand (eútricos y dístricos)->Typic Hapludand (óxicos)

De acuerdo a este secuencia, se realizó otro análisis de correlación lineal simple entre las propiedades seleccionadas y la secuencia evolutiva determinada, cuyo resultado se presenta en la tabla 5.7.

Tabla 5.7. Coeficientes de correlación lineal entre las propiedades seleccionadas (valores ponderados) y el orden predeterminado de desarrollo de los perfiles

	R^2
DRP	**0.61**
DA	**0.10**
H_2O	**0.88**
Est	**0.01**
Li+arc	**0.69**
pHd	**0.27**
Pret	**0.76**
CIC	**0.72**
Sa	**0.84**
Parker	**0.39**
Fes	**0.46**

Como se observa en la tabla 5.7 las propiedades que poseen los coeficientes de correlación más altos con respecto a la secuencia evolutiva, son DRP (0.61), li+arc (0.69), H_2O (0.88), Pret (0.76), CIC (0.72) y Sa (0.84), los cuales siguen una tendencia lineal de aumento o disminución en el contenido que presenta cada perfil, de acuerdo al orden preestablecido (Figuras 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4, 5.5 y 5.6).

La tendencia de evolución que se observó en los valores de DRP, en general, fue hacia el aumento (Fig. 5.1), tendencia similar a la reportada en diferentes investigaciones (Meixner y Singer, 1980; Birkeland et al., 1991). Entre las propiedades físicas, la fracción acumulada li+arc presentó una tendencia muy similar al DRP, de aumento en sus valores al progresar el desarrollo de los suelos Miura et al., 1988; Shoji et al., 1990).. Sin embargo, la propiedad más representativa resultó ser la retención de agua, cuyo valor se incrementó, de manera proporcional con la evolución (Fig. 5.3), lo cual coincide con lo reportado por Shoji et al., 1987; Shoji et al., 1990; VanWanbeke, 1991 y Nanzyo et al., 1993.

Con respecto a la retención de fosfatos y la capacidad de intercambio catiónico (Fig. 5.4 y 5.5), los cambios que se observaron en los valores fue de aumento con la evolución, aunque de acuerdo con la literatura, en Andisoles con alto grado de

Fig. 5.1 Relación entre DRP y la secuencia evolutiva

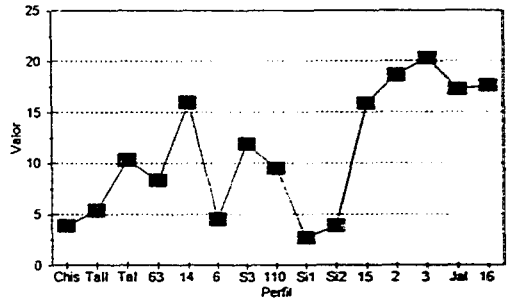


Fig. 5.2 Relación entre Li+arc y la secuencia evolutiva

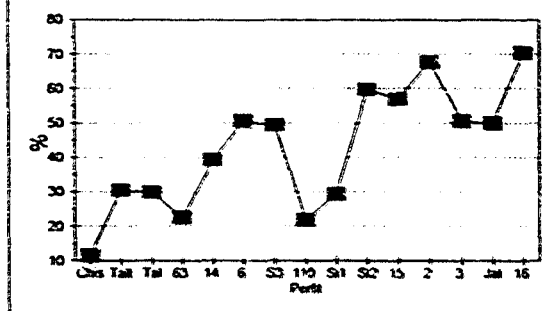


Fig. 5.3 Relación entre H2O y la secuencia evolutiva

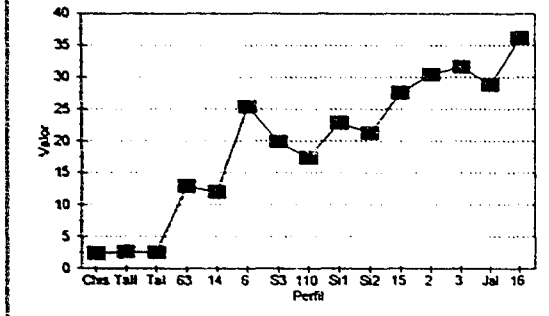


Fig. 5.4 Relación entre Pret y la secuencia evolutiva

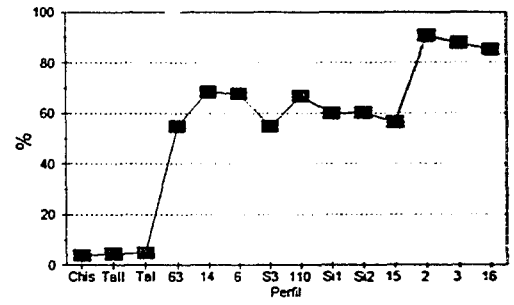


Fig. 5.5 Relación entre Pret y la secuencia evolutiva

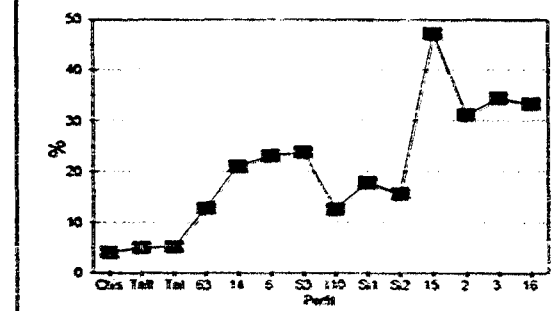
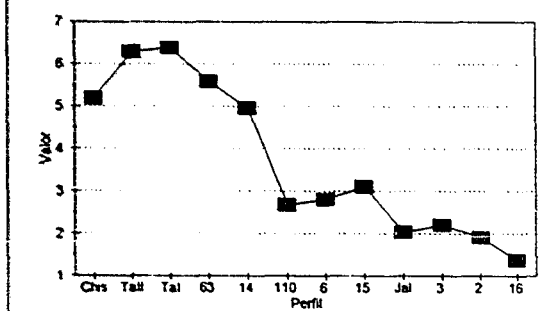


Fig. 5.6 Relación entre Sa y la secuencia evolutiva



desarrollo y que se encuentran en el límite con otros órdenes de suelos, los valores disminuyen (Shoji et al., 1993). De estas dos propiedades la que sigue una marcada tendencia lineal es la CIC, mientras que Pret muestra una curva exponencial, que bien pudiera considerarse lineal en los estados intermedios de evolución (Fig. 5.4).

En relación a los índices de alteración, la relación sílice/aluminio es la que mejor se ajustó a la secuencia evolutiva, representada por una regresión lineal, que disminuye a lo largo de los estadíos de desarrollo (Fig. 5.6), coincidiendo con lo expuesto por VanWanbeke (1991).

5.4 Relación entre propiedades de los suelos y factores formadores.

Por otro lado, se ha hecho un análisis del comportamiento de las propiedades e índices seleccionadas con respecto a los factores formadores, con el fin de evaluar la influencia de estos últimos en el desarrollo de suelos. Para este análisis se ha considerado la composición del material parental: materiales volcánicos ácidos y básicos; el clima, caracterizado por el índice de agresividad climática; y el tiempo, determinado por la edad del material parental.

5.4.1 Relación con los factores material parental y clima

Se ha observado que el desarrollo relativo del perfil es mayor en los suelos derivados de materiales básicos, en todos los suelos, excepto el Vitrandic Udorthent, el cual representa un suelo joven (3 años) dentro de los estudiados y, por lo mismo, no ha tenido suficiente tiempo para un desarrollo considerable. En relación al clima, no se observó un comportamiento definido de los suelos derivados de estos materiales (Fig. 5.7 a y b).

Con respecto al contenido de la fracción acumulada limo más arcilla, éste parece no obedecer un patrón específico en relación a la composición del material original ni a la agresividad climática, ya que las variaciones en su contenido se relacionan más con la granulometría del depósito original, que con la naturaleza básica o ácida de los materiales volcánicos (Fig. 5.7 a y b).

Por su parte, la capacidad de retención de humedad (H_2O) mostró valores más altos en los suelos derivados de materiales básicos y bajo climas con valores altos del índice de agresividad climática. Por el contrario, la retención de fosfatos (Pret) no mostró un patrón homogéneo y ninguna relación clara con la composición del material parental ni con la agresividad climática (Fig. 5.8 a y b). La capacidad de intercambio catiónico (CIC) fue ligeramente mayor en los perfiles procedentes de materiales básicos, sin obedecer a ninguna tendencia específica en el caso del clima (Fig. 5.9 a y b). Finalmente, se observó que la relación sílice/aluminio (Sa) fue siempre mayor en los perfiles derivados de materiales ácidos, lo que implicó que estos suelos poseen menor alteración.

Fig. 5.7a DRP en suelos derivados de materiales ácidos

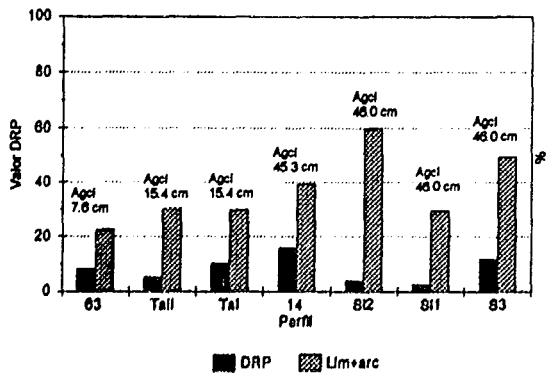


Fig. 5.7b DRP y lim+arc de suelos derivados de materiales andesíticos

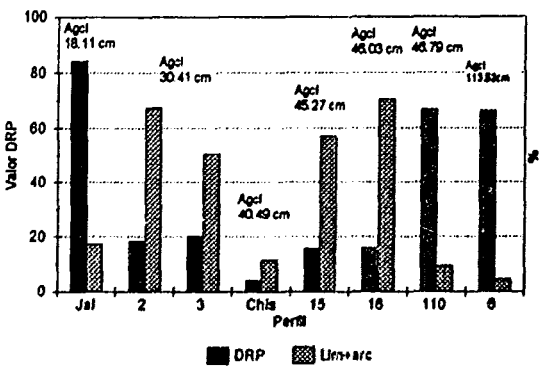


Fig. 5.8a Sa y CIC en suelos derivados de materiales ácidos

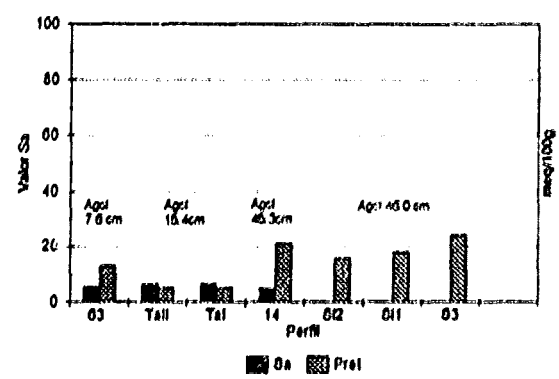


Fig5.8b Sa y CIC en suelos derivados de materiales andesíticos

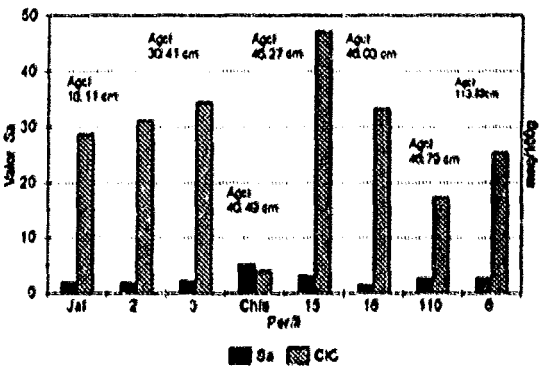


Fig. 5.9a Ret y Pret en suelos derivados de materiales ácidos

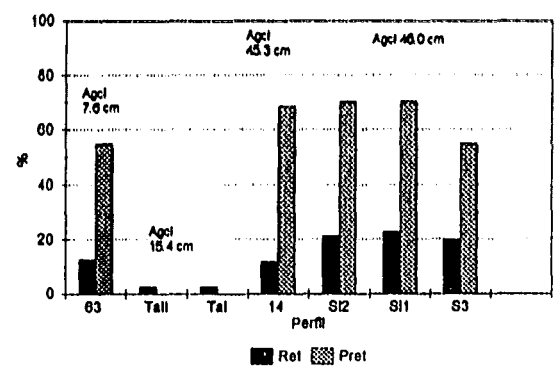
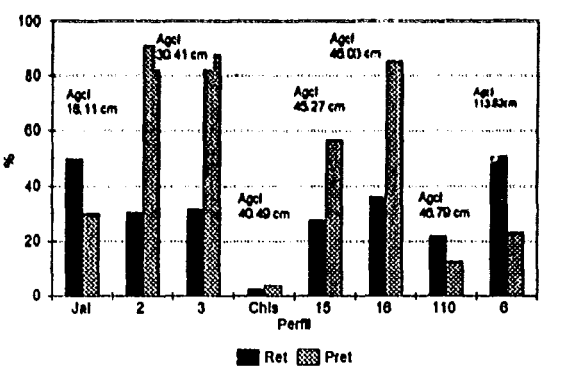


Fig. 5.9b Ret y Pret en suelos derivados de materiales andesíticos



Como se observa en este análisis, no todas las propiedades seleccionadas parecen seguir un patrón de comportamiento claro, en cuanto a los factores material parental y clima. Sin embargo, tanto Sa, como H_2O y CIC están relacionadas a la composición de la roca madre y a las conciciones climáticas bajo la cual están expuestos los suelos. La fracción acumulada de limo y arcilla también se encontró relacionada con el tipo del material parental, granulometría y espesor de los depósitos, pero no con su composición.

5.4.2 Relación con el factor tiempo (edad de los depositos)

Con respecto al factor tiempo, se tomó en cuenta la edad de los depósitos, ya que se consideró que la alteración de las cenizas volcánicas comienza casi inmediatamente después de su depósito (Shoji et al., 1991). Así, se observó que la fracción acumulada limo más arcilla aumentó con la edad del depósito del material volcánico, tanto en aquéllos de composición básica como los de composición ácida, con excepción de los localizados bajo un clima templado, con un índice de agresividad climática pequeño (15.41cm; Fig. 5.10 a y b).

Por su parte, el desarrollo relativo del perfil no mostró ninguna tendencia clara de cambio con respecto a la edad de los suelos, por lo que puede decirse que dentro del área estudiada no tiene una relación significativa, y que este índice es dependiente del los otros factores formadores, sobre todo, clima y material parental (Fig. 5.10 a y b).

5.5 El modelo

Después de realizar el análisis previo de la tendencia de cambio de las propiedades seleccionadas a lo largo del perfil, se eligió un modelo lineal para representar las etapas de desarrollo de los Andisoles estudiados. Si bien, como se ha mencionado, no todas las propiedades presentaron un comportamiento lineal, se decidió que un modelo lineal es conveniente por su mayor simplicidad y a que refleja, en gran medida, el fenómeno que se está investigando.

Como se mencionó en capítulos previos, el modelo que se propone es un modelo lineal de regresión múltiple de la forma:

$$Y=\beta_0+\beta_1X_1+\ldots+\beta_nX_n,$$

donde β_0, $\beta_1,\ldots,\beta_n$ son parámetros desconocidos, $X_1,\ldots X_n$ son constantes conocidas que, en este caso están representadas por las propiedades y relaciones seleccionadas y Y es la variable de respuesta que corresponde a una de las propiedades de los suelos que resulta ser la más representativa con las etapas de desarrollo.

Fig 5.10a Relación entre DRP y li+arc
y la edad de los materiales básicos

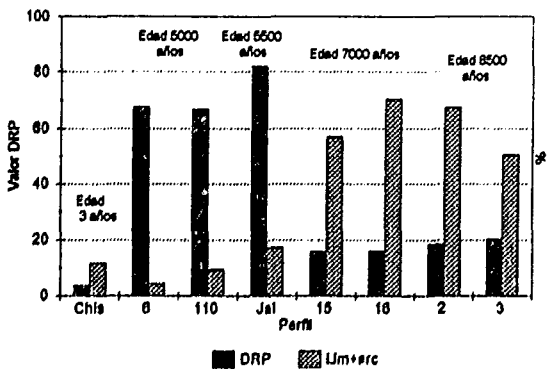
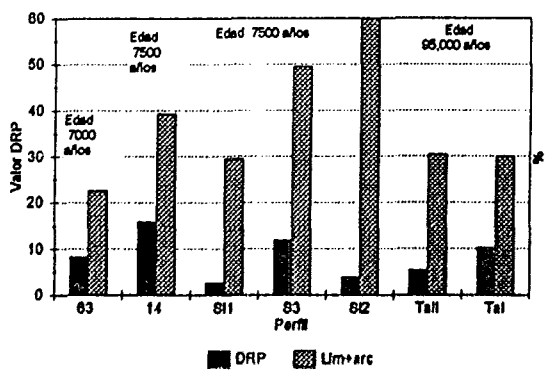


Fig 5.10b Relación entre DRP y li+arc
y la edad de los materiales ácidos



5.5.1 Propiedades que representaron a las variables en el modelo

Las variables que se eligieron fueron la relación sílice/aluminio (Sa), la retención de agua a 1500 kPa (H_2O), la retención de fosfatos (Pret), la capacidad de intercambio catiónico (CIC), el desarrollo relativo del perfil (DRP) y la fracción acumulada limo más arcilla (Li+arc), que, como se mencionó anteriormente, fueron los que arrojaron los valores de R^2 más altos.

De estas variables se eligió, por un lado, a DRP como variable de respuesta; y por el otro a la suma limo más arcilla, para construir dos modelos. Se seleccionó a DRP, porque en diversas investigaciones, tanto de suelos como de paleosuelos, se hace referencia a este índice como una buena medida del grado de desarrollo de un suelo (Birkeland, 1967; Yaalon, 1971; Meixner y Singer, 1981; Birkeland, 1984; Birkleland et al., 1991; Retallack, 1988, 1993). Con respecto a la suma limo y arcilla se consideró que es un índice adecuado para medir el grado de evolución del suelo que, por lo mismo, puede ser un parámetro efectivo para determinar la edad evolutiva del suelo, ya que se observó que esta relación aumentó con la edad de los depósitos, independientemente de su composición, como se explicó en el punto 5.4.2.

5.5.2 Regresión lineal múltiple de las variables seleccionadas

Con esta base, se realizó un análisis de regresión lineal múltiple, para encontrar la ecuación de regresión que caracterizó a cada modelo evolutivo. Cabe aclarar que se construyeron varios modelos de regresión para, posteriormente, elegir al más adecuado a los fines de este trabajo, es decir, aquél que reflejara claramente la secuencia do evolución teórica que siguen los suelos derivados de materiales volcánicos.

En uno de los modelos se tomó en cuenta el valor de Pret y en el otro se eliminó, para determinar la influencia de esta propiedad en la ecuación resultante. El criterio para considerar o no a Pret es que se tienen dos propiedades químicas (CIC y Pret), de las cuales CIC posee un valor ligeramente menor de R^2 con respecto a Pret (0.76 y 0.72, respectivamente; tabla 5.7). Sin embargo, CIC posee una tendencia de cambio que se ajustó a una regresión lineal con respecto a la secuencia evolutiva (Fig. 5.4).

a. Modelos que consideran a DRP como variable de respuesta

Los modelos que consideran a DRP como variable de respuesta que se construyeron fueron dos, uno que incluyó los valores de Pret y el otro que sólo tomó en cuenta a cuatro variables X (relación sílice/aluminio, suma limo más arcilla, retención de agua y capacidad de intercambio catiónico. Los valores considerados para el análisis de regresión lineal múltiple se presentan en la tabla

5.8 y los resultados de la regresión lineal múltiple se muestran en las tablas 5.9 y 5.10.

Tabla 5.8 Valores considerados para la regresión múltiple entre DRP y el resto de las variables

	Y	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
Perfil	DRP	Sa	Li+arc	H_2O	CIC	Pret
Chis	3.85	6.19	11.52	2.40	4.07	3.80
TalI	5.36	6.29	30.44	2.64	5.00	4.50
Tal	10.31	6.39	29.88	2.53	5.16	4.80
63	8.30	5.59	21.79	17.37	12.64	66.83
14	15.95	4.95	22.56	12.90	12.88	54.86
6	4.50	2.81	50.65	25.35	23.15	67.85
S3	6.50	4.00	39.34	11.99	21.05	68.43
110	9.48	2.68	49.42	19.85	23.80	54.85
Si1	5.15	3.50	29.45	22.88	17.88	59.95
Si2	6.70	3.20	59.80	21.26	15.60	60.20
15	15.86	3.10	57.01	27.56	47.23	56.44
2	18.64	1.91	67.61	30.44	31.17	90.82
3	20.32	2.20	50.51	31.64	34.46	87.76
Jal	17.27	2.03	49.92	28.78	30.00	85.00
16	17.61	1.37	70.38	36.18	33.34	85.34

Tabla 5.9 Resultado de la regresión tomando Y=DRP, considerando Pret

Constante	-11.71				
Err estándar de est.Y	4.74				
R cuadrado	0.62				
Núm.de observaciones	15				
Grado de libertad	9				
Coeficiente(s) X	2.01	0.07	0.12	0.27	0.07
Err estándar de coef.	2.43	0.15	0.11	0.18	0.09

Tabla 5.10 Resultado de la regresión tomando Y=DRP, sin considerar Pret

Constante		-2.42			
Err estándar de est.Y		4.67			
R cuadrado		0.59			
Núm.de observaciones		15			
Grado de libertad		10			
Coeficiente(s) X		0.81	0.03	0.14	0.29
Err estándar de coef.	1.89	0.14	0.11	0.18	

De estas dos ecuaciones, la que arrojó un valor más alto de R^2 es la que considera a la retención de fosfatos, de tal forma que se concluye que esta propiedad sí influye en el desarrollo relativo del perfil. Los valores tan altos de error estándar se deben a que el número de datos con el que se trabajó es pequeño, pero pueden ser optimizados al considerar a un mayor número de perfiles.

Así, las ecuaciones obtenidas son:

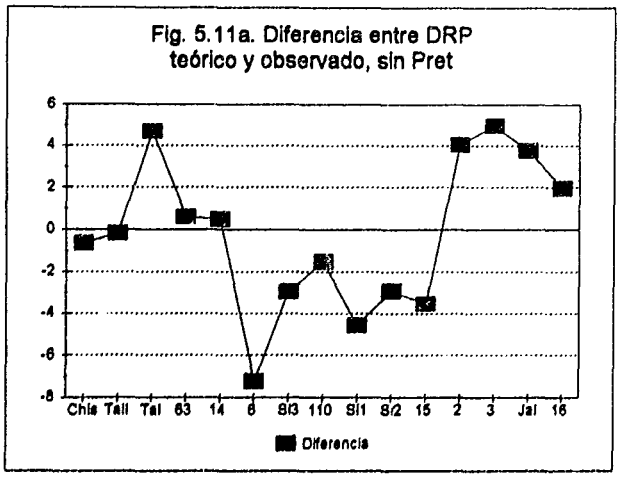
$$Y = 2.01X_1 + 0.07\ X_2 + 0.12\ X_3 + 0.27\ X_4 + 0.07\ X_5 - 11.71 \qquad (1)$$
$$Y = 0.81X_1 + 0.03X_2 - 0.14\ X_3 + 0.29X_4 - 2.42 \qquad (2)$$

donde X_1 Sa
X_2 lim+arc
X_3 H_2O
X_4 CIC
X_5 Pret

(1) ecuación de regresión considerando Pret
(2) ecuación de regresión sin considerar Pret

tal que en ellas se sustituyeron los valores correspondientes a cada variable X_n para obtener los valores de DRP teóricos y compararlos con aquellos obtenidos por el método de Bilzi y Ciolkosz (1977) y se restaron uno del otro (tabla 5.11). Esta diferencia se graficó para determinar qué tanto se desvían los datos obtenidos, de los medidos en los perfiles (Fig. 5.11 a y b). Así, se observó que las desviaciones no eran grandes, y que la tendencia seguida por ambas valores en las dos ecuaciones era similar (Fig. 5.12 a y b).

De hecho, para la primera ecuación, el 40% de los datos poseen diferencias que se ubicaron entre 2 y -2; el 33% se encuentra entre 2 y 4 y -2 y -4; y el 20% está entre 4 y 6 y -4 y -6, teniéndose sólo un valor extremo en 7.53 (tabla 5.12). La media de los valores observados es 10.69, mientras que la de los valores calculados es 11.46, con una desviación estándar de 4.73 (tabla 5.12). Para la



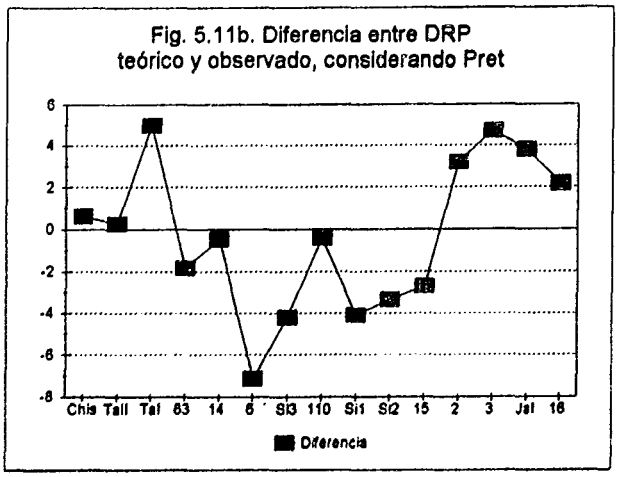


Fig. 5.11 Diferencia entre DRP observado y teórico obtenido con las ecuaciones de regresión que (a) no considera a Pret y (b) considera a Pret

ecuación dos, el 33% de los datos está entre 2 y -2; el 40% entre 2 y 4 y -2 y -4 y el 20% entre 4 y 6 y -4 y -6, con un valor extremo en (7.56). Para este caso, la media es 11.52 y la desviación estándar es 4.85 (tabla 5.13).

De esta manera, ambas ecuaciones tienen las mismas diferencias con respecto a los valores teóricos, y valores parecidos para la media y la desviación estándar.

Tabla 5.11. Valores de DRP calculados con las ecuaciones obtenidas y diferencias entre los valores de DRP observados y teóricos.

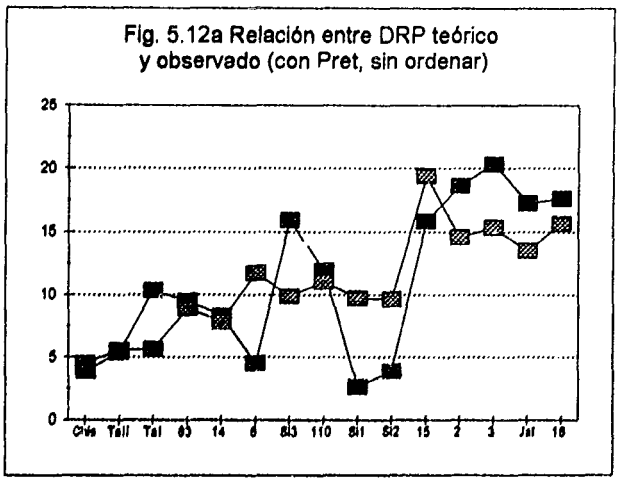
Perfil	DRP^1	DRP^2	Diferencia	DRP^3	Diferencia
Chis	3.85	3.23	0.63	4.50	-0.64
Tall	5.36	5.11	0.25	5.53	-0.17
Tal	10.31	5.32	4.99	5.63	4.69
63	8.30	11.33	-1.85	8.87	0.61
14	15.95	8.77	-0.47	7.84	0.47
6	4.50	11.64	-7.14	11.72	-7.22
S3	6.50	11.09	-4.19	9.87	-2.97
110	9.48	9.88	-0.40	11.01	-1.53
Si1	5.15	9.25	-4.10	9.70	-4.55
Si2	6.70	10.04	-3.34	9.63	-2.93
15	15.86	18.56	-2.70	19.40	-3.54
2	18.64	15.44	3.19	14.58	4.06
3	20.32	15.61	4.71	15.34	4.98
Jal	17.27	13.48	3.79	13.50	3.77
16	17.61	15.45	2.16	15.65	1.96

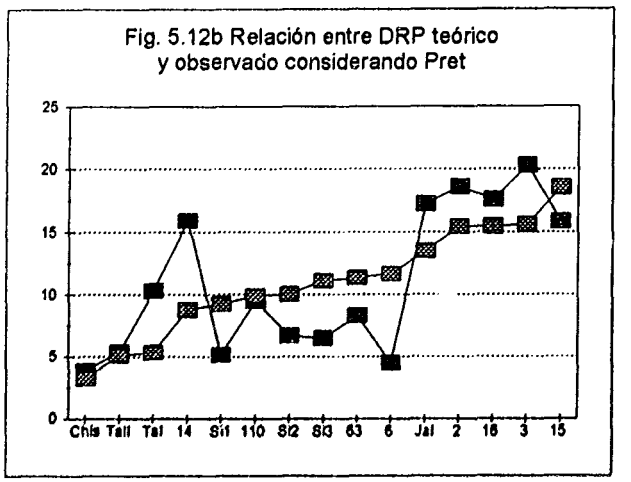
DRP^1 DRP observado, medido con el método de Bilzi y Ciolkosz (1977)
DRP^2 DRP teórico, calculado con la ecuación de regresión sin considerar Pret
DRP^3 DRP teórico, calculado con la ecuación de regresión considerando Pret

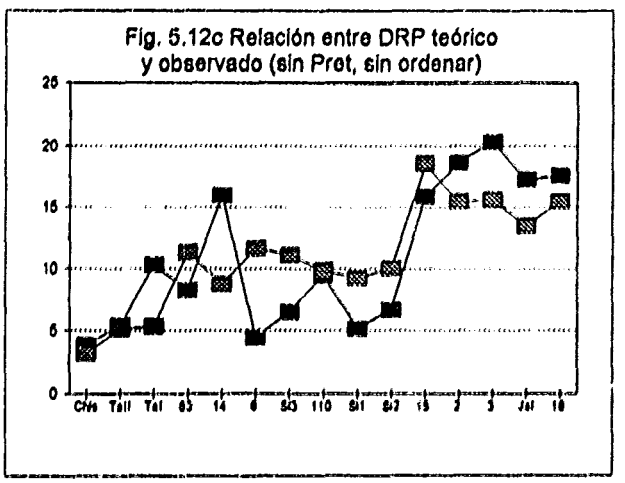
Tabla 5.12. Intervalos de valores de las diferencias entre los valores de limo más arcilla teóricos y calculados y porcentaje de datos que cayó en cada intervalo.

Intervalo	Ecuación 1	Ecuación 2
-2 y 2	40.0	33.3
-4 a -2 4 a 2	33.3	40.0
-6 a -4 6 a 4	20.0	20.0
-6 a -8 6 a 8	6.7	6.7

ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA







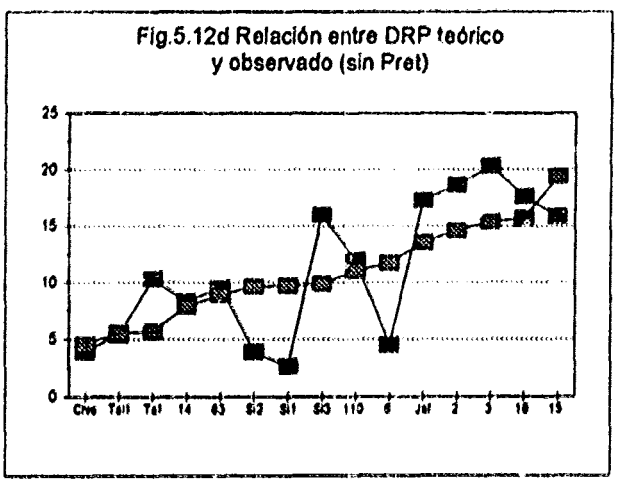


Fig. 5.12. Relación entre DRP observado y teórico, obtenido con las ecuaciones de regresión a y b corresponden a la ecuación que considera a Pret, mientras que c y d corresponden a la ecuación que no toma en cuenta a Pret
Además (b) y (d) corresponden a las gráficas con valores ordenados.

Tabla 5.13. Valores de la media, desviación estándar (σ) y R^2 para las ecuaciones obtenidas.

Ecuación	Media	σ	R2
1	11.46	4.73	0.59
2	11.52	4.85	0.62

Por otro lado, al ordenar los valores teóricos de DRP de cada suelo estudiado, de manera ascendente, cambia el orden preestablecido de desarrollo (de acuerdo a las consideraciones hechas en el punto 5.3, de tal suerte que la secuencia evolutiva no se asemeja a la teórica (Figs. 5.12 c y d).

Las secuencias evolutivas obtenidas por medio de las ecuaciones anteriores son las siguientes:

Ecuación (1)

Chis-> Tall-> Tal->14-> Si1-> 110-> Si2-> Si3-> 63-> 6-> Jal -> 2-> 16-> 3-> 15

Ecuación (2)

Chis-> Tall-> Tal-> 14-> 63-> Si2-> Si1-> Si3-> 110-> 6-> Jal -> 2-> 3-> 16-> 15

b. Modelos que consideran a la fracción acumulada limo más arcilla como variable de respuesta

De acuerdo a los resultados obtenidos con las ecuaciones anteriores, se realizó otra regresión lineal múltiple, tomando como variable de respuesta Y, a la suma limo más arcilla, obteniéndose cuatro ecuaciones: (3) la que consideró a todas las variables; (4) la que eliminó a Pret; (5) la que eliminó a DRP; (6) la que eliminó tanto a Pret como a DRP. Para la ecuación (5), se consideró importante eliminar a DRP, porque de todas las variables, ésta es la que tiene un carácter cualitativo y es interesante evaluar qué tan significativa resulta. Los valores considerados para el análisis se muestran en la tabla 5.14, mientras que los resultados de la regresión lineal se presentan en las tablas 5.15, 5.16, 5.17 y 5.18.

Tabla 5.14 Valores considerados para la regresión múltiple entre limo+arcilla y el resto de las variables

	Y	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
Perfil	Li+arc	Sa	H_2O	CIC	Pret	DRP
Chis	11.52	6.19	2.40	4.07	3.80	3.85
Tall	30.44	6.29	2.64	5.00	4.50	5.36
Tal	29.88	6.39	2.53	5.16	4.80	10.31
63	21.79	5.59	17.37	12.64	66.83	8.30
14	22.56	4.95	12.90	12.88	54.86	15.95
6	50.65	2.81	25.35	23.15	67.85	4.50
S3	39.34	4.00	11.99	21.05	68.43	6.50
110	49.42	2.68	19.85	23.80	54.85	9.48
Si1	29.45	3.50	22.88	17.88	59.95	5.15
Si2	59.80	3.20	21.26	15.60	60.20	6.70
15	57.01	3.10	27.56	47.23	56.44	15.86
2	67.61	1.91	30.44	31.17	90.82	18.64
3	50.51	2.20	31.64	34.46	87.76	20.32
Jal	49.92	2.03	28.78	30.00	85.00	17.27
16	70.38	1.37	36.18	33.34	85.34	17.61

Tabla 5.15 Resultado de la regresión tomando Y=limo+arcilla, considerando todas las variables

Constante	40.89				
Err estándar de est.Y	11.90				
R cuadrado	0.76				
Núm.de observaciones	15				
Grado de libertad	9				
Coeficiente(s) X	-3.96	0.28	0.57	-0.09	0.33
Err estándar de coef.	4.93	0.30	0.45	0.25	0.80

Tabla 5.16 Resultado de la regresión tomando Y=limo+arcilla, sin considerar Pret

Constante	31.94			
Err estándar de est.Y	11.46			
R cuadrado	0.75			
Núm.de observaciones	15			
Grado de libertad	10			
Coeficiente(s) X	-2.69	0.29	0.56	0.24
Err estándar de coef.	3.34	0.29	0.43	0.73

Tabla 5.17 Resultado de la regresión tomando Y=limo+arcilla, sin considerar DRP

Constante	-38.43			
Err estándar de est.Y	11.48			
R cuadrado	0.75			
Núm.de observaciones	15			
Grado de libertad	10			
Coeficiente(s) X	-3.48	0.32	0.65	-0.06
Err estándar de coef.	4.62	0.28	0.38	0.23

Tabla 5.18 Resultado de la regresión tomando Y=limo+arcilla, sin considerar DRP y Pret

Constante	32.50		
Err estándar de est.Y	11.06		
R cuadrado	0.75		
Núm.de observaciones	15.00		
Grado de libertad	11.00		
Coeficiente(s) X	-2.67	0.32	0.63
Err estándar de coef.	3.23	0.27	0.36

Las ecuaciones obtenidas son:

$Y = -3.96 X_1 + 0.28 X_2 + 0.57 X_3 - 0.09 X_4 + 0.33 X_5 + 40.89$ (3)
$Y = -2.69 X_1 + 0.29 X_2 + 0.56 X_3 + 0.24 X_4 + 31.94$ (4)
$Y = -3.48 X_1 + 0.32 X_2 + 0.65 X_3 - 0.06 X_4 + 38.43$ (5)
$Y = -2.67 X_1 + 0.32 X_2 + 0.63 X_3 - 32.50$ (6)

donde X_1 = Sa; $X_2 = H_2O$; X_3 =CIC; X_4 =Pret;
X_5 DRP para la ecuación (3) y:
X_4 DRP para la ecuación (4)
X_4 Pret para la ecuación (5)
(3) ecuación de regresión considerando Pret y DRP
(4) ecuación de regresión sin considerar Pret
(5) ecuación de regresión sin considerar DRP
(6) ecuación de regresión sin considerar DRP ni Pret.

Como se observa, las 4 ecuaciones anteriores arrojaron valores similares de R^2 (0.75) y al igual que con las ecuaciones donde Y=DRP, los valores tan altos de error estándar obtenidos se deben a que el número de datos es pequeño.

Ahora bien, con las ecuaciones resultantes se calcularon los valores de limo más arcilla teóricos y se compararon con aquellos medidos en laboratorio, restando el valor teórico del observado (tabla 5.19). Esta diferencia se graficó para determinar qué tanto se desvían los datos calculados, de los observados en los suelos (Fig. 5.13). Las desviaciones obtenidas no fueron grandes en la mayor parte de los suelos y la tendencia seguida por ambos valores de acuerdo a la secuencia evolutiva, en todos las ecuaciones fue similar (Fig. 5.14 a, c, e y g).

Tabla 5.17 Resultado de la regresión tomando Y=limo+arcilla, sin considerar DRP

Constante	-38.43			
Err estándar de est.Y	11.48			
R cuadrado	0.75			
Núm.de observaciones	15			
Grado de libertad	10			
Coeficiente(s) X	-3.48	0.32	0.65	-0.06
Err estándar de coef.	4.62	0.28	0.38	0.23

Tabla 5.18 Resultado de la regresión tomando Y=limo+arcilla, sin considerar DRP y Pret

Constante	32.50		
Err estándar de est.Y	11.06		
R cuadrado	0.75		
Núm.de observaciones	15.00		
Grado de libertad	11.00		
Coeficiente(s) X	-2.67	0.32	0.63
Err estándar de coef.	3.23	0.27	0.36

Las ecuaciones obtenidas son:

$Y = -3.96\ X_1 + 0.28\ X_2 + 0.57\ X_3 - 0.09\ X_4 + 0.33\ X_5 + 40.89$ (3)

$Y = -2.69\ X_1 + 0.29\ X_2 + 0.56\ X_3 + 0.24\ X_4 + 31.94$ (4)

$Y = -3.48\ X_1 + 0.32\ X_2 + 0.65\ X_3 - 0.06\ X_4 + 38.43$ (5)

$Y = -2.67\ X_1 + 0.32\ X_2 + 0.63\ X_3 - 32.50$ (6)

donde X_1 = Sa; $X_2 = H_2O$; X_3 =CIC; X_4 =Pret;

X5 DRP para la ecuación (3) y:

X_4 DRP para la ecuación (4)

X_4 Pret para la ecuación (5)

(3) ecuación de regresión considerando Pret y DRP

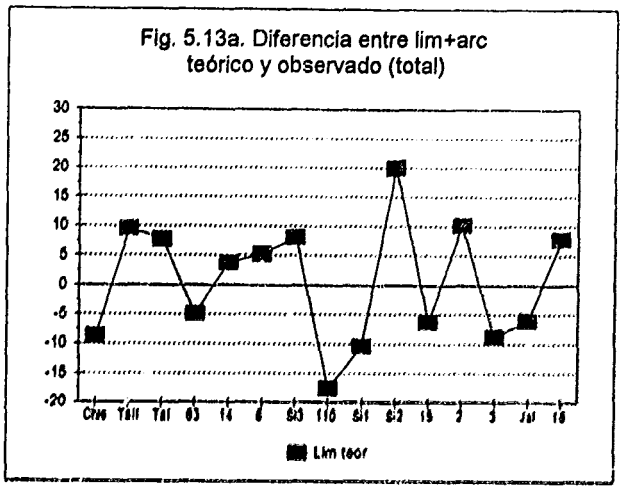
(4) ecuación de regresión sin considerar Pret

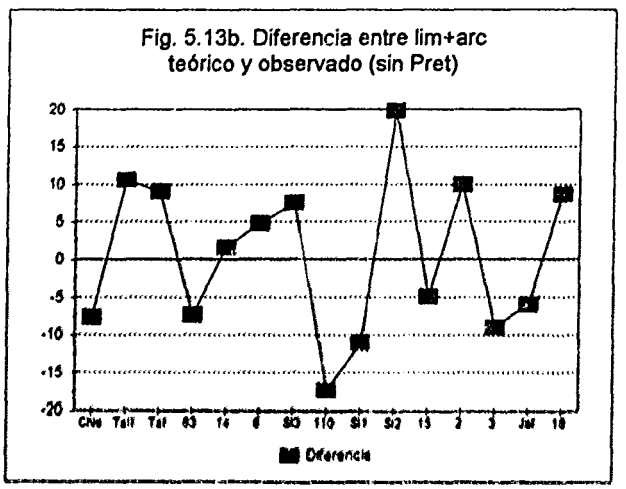
(5) ecuación de regresión sin considerar DRP

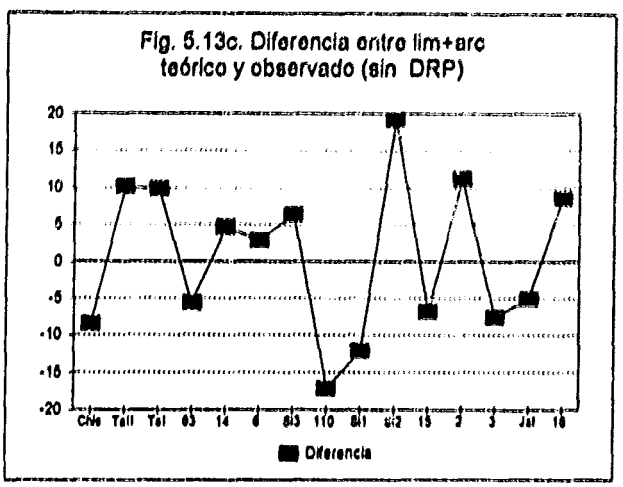
(6) ecuación de regresión sin considerar DRP ni Pret.

Como se observa, las 4 ecuaciones anteriores arrojaron valores similares de R^2 (0.75) y al igual que con las ecuaciones donde Y=DRP, los valores tan altos de error estándar obtenidos se deben a que el número de datos es pequeño.

Ahora bien, con las ecuaciones resultantes se calcularon los valores de limo más arcilla teóricos y se compararon con aquellos medidos en laboratorio, restando el valor teórico del observado (tabla 5.19). Esta diferencia se graficó para determinar qué tanto se desvían los datos calculados, de los observados en los suelos (Fig. 5.13). Las desviaciones obtenidas no fueron grandes en la mayor parte de los suelos y la tendencia seguida por ambos valores de acuerdo a la secuencia evolutiva, en todos las ecuaciones fue similar (Fig. 5.14 a, c, e y g).







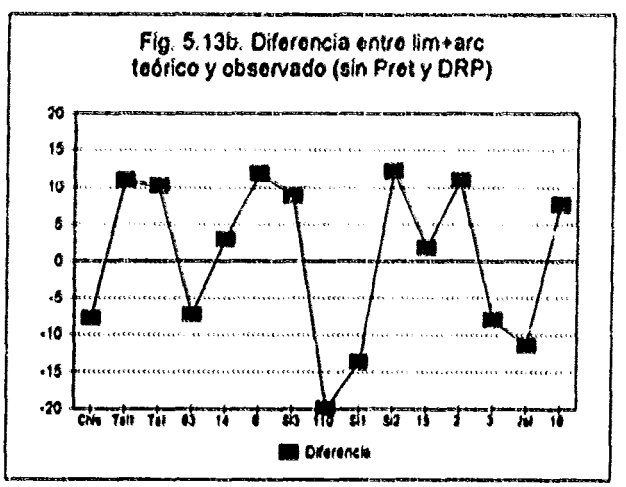


Fig. 5.13. Diferencia entre li+arc observado y teórico obtenido con las ecuaciones de regresión que (a) toma todas las variables; (b) no considera a Pret; (c) no considera a DRP; y (d) no considera a DRP ni a Pret

Tabla 5.19. Valores de limo+arcilla calculados con las ecuaciones obtenidas y diferencias entre los valores de li+arc observados y teóricos.

Perfil	Li+arc[1]	Li+arc[2]	Diferencia	Li+arc[3]	Diferencia	Li+arc[4]	Diferencia	Li+arc[4]	Diferencia
Chis	11.52	20.25	-8.74	19.18	-8.53	20.05	-7.66	19.32	-7.80
Tall	30.44	20.89	9.55	19.87	10.09	20.35	10.57	19.53	10.91
Tal	29.88	22.16	7.72	20.83	9.81	20.06	9.04	19.72	10.15
63	22.56	27.41	-4.85	29.88	-5.64	28.20	-7.32	29.82	-7.26
14	39.34	35.59	3.75	37.73	4.67	34.67	1.61	36.39	2.95
6	50.65	45.39	5.26	45.89	2.86	47.79	4.76	38.84	11.81
S3	49.42	41.31	8.11	41.90	6.34	43.08	7.52	40.56	8.86
110	21.79	39.36	-17.57	39.17	-17.10	38.89	-17.38	41.71	-19.92
Si1	29.45	39.87	-10.42	40.49	-12.16	41.61	-11.04	43.15	-13.70
Si2	59.80	39.79	20.01	39.92	19.16	40.64	19.88	47.67	12.13
15	57.01	63.29	-6.28	61.94	-6.84	63.85	-4.93	55.15	1.86
2	67.61	57.46	10.15	57.64	11.22	56.39	9.97	56.73	10.88
3	50.51	59.35	-8.84	59.45	-7.57	58.08	-8.95	58.41	-7.90
Jal	49.92	55.94	-6.03	55.86	-5.12	55.03	-5.94	61.35	-11.44
16	70.38	62.62	7.76	61.75	8.56	61.82	8.63	62.77	7.61

Li+arc[1] Limo+arcilla observado, medido en laboratorio
Li+arc[2] Limo+arcilla teórico, calculado con la ecuación, todas las variables (3)
Li+arc[3] Limo+arcilla teórico, calculado con la ecuación sin considerar Pret (4)
Li+arc[4] Limo+arcilla teórico, calculado con la ecuación sin considerar DRP (5)
Li+arc[5] Limo+arcilla teórico, calculado con la ecuación sin considerar DRP y Pret (6)

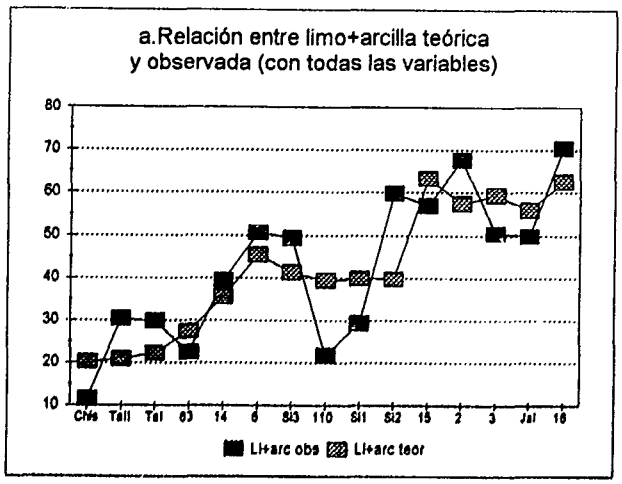
De acuerdo con las diferencias obtenidas, en las ecuaciones (3), (4) y (5), el 73.3% de los valores se encuentran entre -10 y 10 (tabla 5.20). Para la ecuación (6), el 46.7% de los datos está entre esos dos valores, mientras que una cantidad igual se ubica entre -15 y -10 y 10 y 15. Para la ecuación (3) la media fue de 42.05 y la desviación estándar de 14.62; para la ecuación (4), la media fue de 42.10 y la desviación estándar de 14.67; para la ecuación (5), la media fue de 42.03 y la desviación estándar de 14.57; y para la ecuación (6) la media fue de 42.08 y la desviación estándar de 14.82. El valor de la media para los datos observados fue de 42.68 (tabla 5.21).

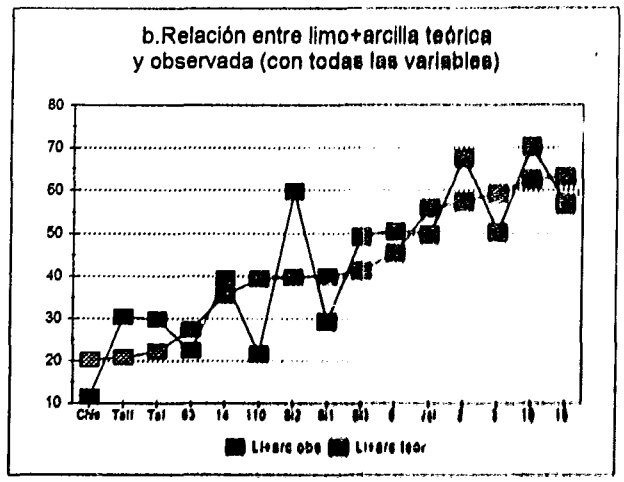
Por otro lado, al ordenar los valores calculados de manera ascendente y conformar la secuencia de desarrollo (Fig. 5.18 b, d, f y h), el orden que se obtuvo fue el siguiente para cada ecuación:

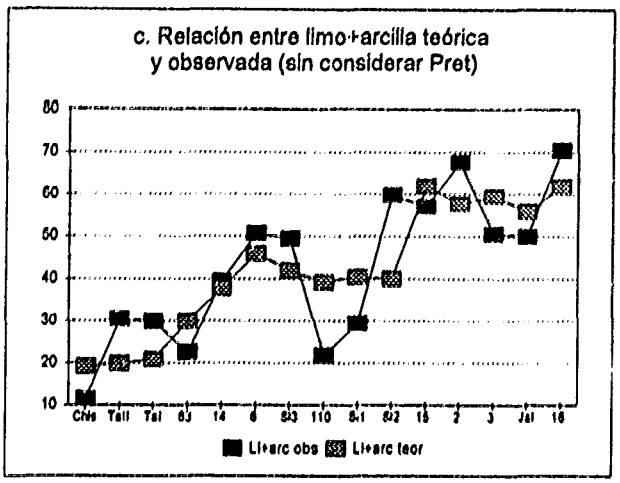
Ecuación 3:
Chis-> Tall-> Tal-> 63-> 14->110 -> Si2-> Si1-> Si3-> 6-> Jal -> 2-> 3-> 16-> 15

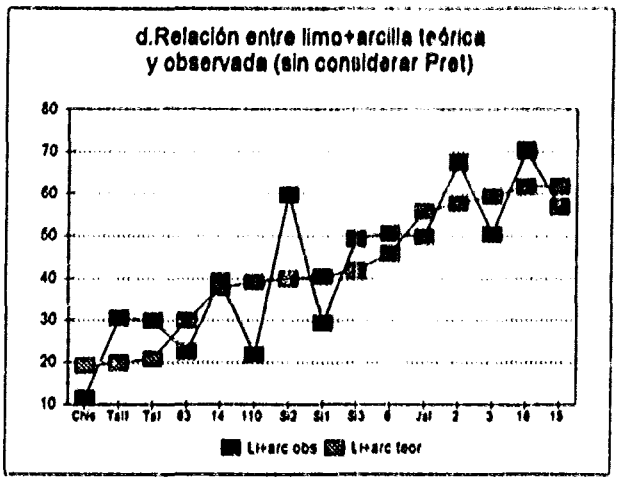
Ecuación 4:
Chis->Tal-> Tall-> 63-> 14-> 110-> Si2-> Si1-> Si3-> 6-> Jal-> 2-> 3-> 16-> 15

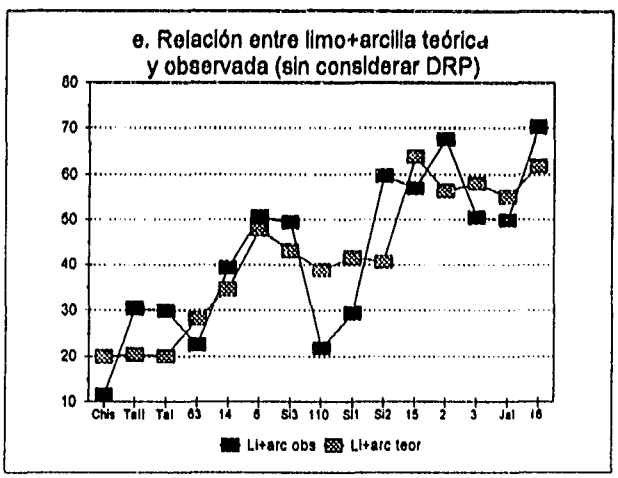
Ecuación 5:
Chis->Tall-> Tal-> 63-> 14-> 110-> Si2-> Si1-> Si3-> 6-> Jal -> 2-> 3-> 16-> 15











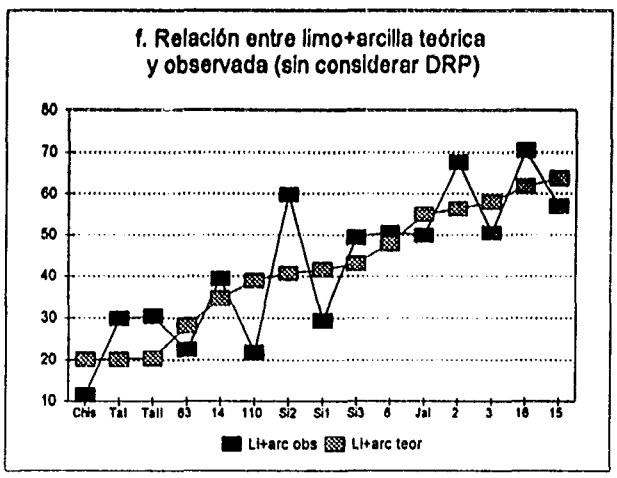
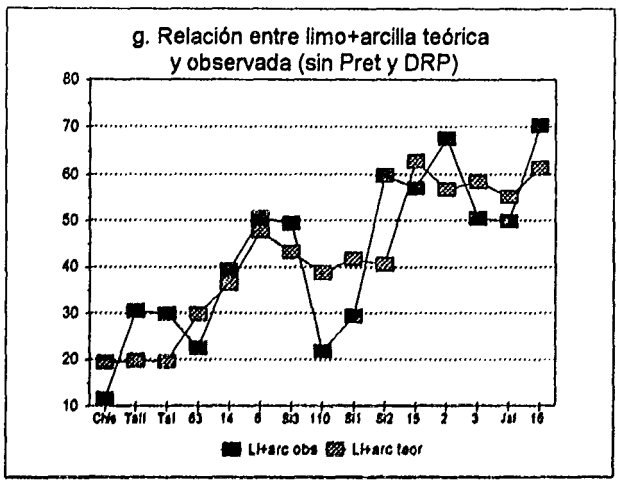


Fig. 5.14. Relación entre li+arc observado y teórico, obtenido con las ecuaciones de regresión
(a) y (b) corresponden a la ecuación que considera a todas las variables; (c) y (d) corresponden a la ecuación que ecuación sin Pret; (e) y (f) a la ecuación que no toma en cuenta a DRP; y, (g) y (h) a la que no toma en cuenta DRP ni Pret. Además (b), (d), (f) y (h) corresponden a las gráficas con valores ordenados.



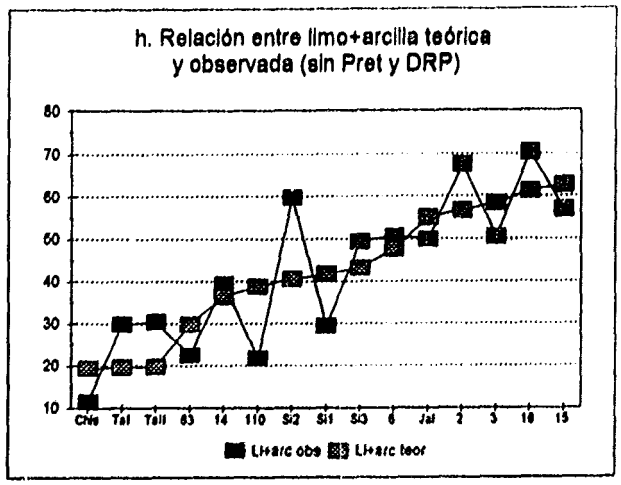


Fig. 5.14. Relación entre li+arc observado y teórico, obtenido con las ecuaciones de regresión (a) y (b) corresponden a la ecuación que considera a todas las variables; (c) y (d) corresponden a la ecuación que ecuación sin Pret; (e) y (f) a la ecuación que no toma en cuenta a DRP; y, (g) y (h) a la que no toma en cuenta DRP ni Pret. Además (b), (d), (f) y (h) corresponden a las gráficas con valores ordenados.

Ecuación 6:
Chis->Tall-> Tal-> 63-> 14-> 110-> Sl2-> Sl1-> Sl3-> 6-> Jal -> 2-> 3-> 16-> 15

Tabla 5.20. Intervalos de valores de las diferencias entre los valores de limo más arcilla teóricos y calculados y porcentaje de datos que cayó en cada intervalo.

Intervalo	Ecuación 3	Ecuación 4	Ecuación 5	Ecuación 6
-5 y 5	13.3	20.0	26.7	13.3
-10 a -5 10 a 5	60.0	53.3	46.7	33.3
-15 a -10 15 a 10	13.3	13.3	13.3	46.7
-15 a -20 15 a 20	13.3	13.3	13.3	6.7

Tabla 5.21. Valores de la media, desviación estándar (σ) y R^2 para las ecuaciones obtenidas.

Ecuación	Media	σ	R^2
3	42.05	14.62	0.76
4	42.10	14.67	0.75
5	42.03	14.57	0.75
6	42.08	14.62	0.75

Analizando las cuatro ecuaciones, puede decirse que todos los modelos arrojaron resultados muy similares, con valores parecidos de los coeficientes de correlación, la media, la desviación estándar, las diferencias entre los datos observados y teóricos y la secuencia evolutiva. Por esta razón, se ha elegido al modelo No. 5, ya que es el que presentó las menores diferencias entre los valores teóricos y los observados, a la vez que elimina a DRP, la cual resulta ser la variable con un carácter cualitativo.

Así se ha concluído que el modelo de regresión lineal que mejor caracteriza la secuencia evolutiva de los Andisoles es el que proporciona la ecuación:

$$Y = -3.48 X_1 + 0.32 X_2 + 0.65 X_3 - 0.06 X_4 + 38.43 \qquad (5)$$

donde X_1 Sa
X_2 H_2O
X_3 CIC
X_4 Pret

Ahora bien, como se observa, no todas las propiedades seleccionadas tienen el mismo peso en la ecuación. La fuerza de la unión entre la fracción acumulada limoamás arcilla (Y) y cada variable (X_n) está dada por el valor β_n. Por ejemplo, la variación en la suma limo y arcilla al cambiar el valor de Sa está dada por β_1. Si se

normalizan los valores de los coeficientes β_n dividiendo cada uno de ellos entre la suma de todos y multiplicándolos por 100, entonces tal valor refleja la fuerza relativa en porcentaje que tiene cada varible X en Y. Dicho porcentaje es el siguiente

Sa influye negativamente en un 77.16%, es decir que a valores más altos de Sa, la suma li+arc disminuye; H_2O influye en un 7.10%; CIC influye en un 14.41%; Pret influye negativamente en un 1.33%

Una relación así proporciona una visión más informativa de la asociación, ya que puede verse la distribución del impacto o relevancia de cada variable en el modelo. Como es notorio, las características que más influyen en la suma limo+arcilla son el índice sílice/aluminio y la capacidad de intercambio catiónico y que, en general, es una medida de la etapa evolutiva en la que se encuentra un perfil determinado. Por su parte, Pret contribuye sólo con un 1.33%, el cual, en conjunto, es un valor muy pequeño.

Con toda la información obtenida y ordenada (tabla 5.22), se proponen cuatro etapas de evolución para el orden Andisol, en contradicción a las que presenta Hetier (1975) quien establece tres etapas de desarrollo para los suelos derivados de materiales volcánicos, las cuales corresponden con una alteración geoquímica y diagenética en la etapa I, una alteración bioclimática e incorporación de la materia orgánica en la etapa II y con el envejecimiento de geles mixtos en la tercera etapa, las cuales no reflejan el comportamiento total que siguen los suelos a lo largo de su evolución. Por otro lado, en diversas investigaciones se señala que la secuencia evolutiva que siguen los Andisoles se lleva a cabo por medio de cuatro etapas (Quantin et al., 1985; Yamada, 1986; Shoji et al., 1993a y b). Con esta base, las etapas propuestas en el presente trabajo representan los siguientes estadíos de desarrollo:

Etapa I. Etapa temprana de alteración de materiales volcánicos. Transición de Entisoles a Andiosles (diferenciación de unos y otros por el criterio del oxalato ácido Al+1/2Fe≥0.4% y la retención de fosfatos >25% (Soil Survey Staff, 1990, 1992).
Etapa II. Incorporación de la materia orgánica, incrementándose el desarrollo del horizonte A. Comienza la diferenciación de un horizonte Bw.
Etapa III. Incorporación de mayores cantidades de alofano e imogolita en el horizonte Bw (cámbico), con propiedades ándicas bien definidas a través del criterio del oxalato ácido Al+1/2Fe≥2.0%, la retención de fosfatos >85% y la densidad aparente ≤0.9 g/cm^3 (Soil Survey Staff, 1990, 1992).
Etapa IV. Etapa más avanzada de la andosolización, que marca la transición de los Andisoles hacia suelos correspondientes a otros órdenes Inceptisoles, Espososoles, Mollisoles, Alfisoles, Ultisoles, e inclusive Oxisoles, dependiendo de las condiciones locales de los factores formadores.

Tabla 5.22 Valores de limo+arcilla ordenados de manera ascendente

Perfil	Observado	Calculado
Chis	11.52	19.32
Tal	29.88	19.53
Tall	30.44	19.72
63	22.56	29.82
14	39.34	36.39
110	21.79	38.84
Si2	59.80	40.56
Si1	29.45	41.71
Si3	49.42	43.15
6	50.65	47.67
Jal	49.92	55.15
2	67.61	56.73
3	50.51	58.41
16	70.38	61.35
15	57.01	62.77

Así, cada una de las etapas establecidas corresponden con valores específicos de limo+arcilla calculados con la ecuación (5), los cuales se presentan en la tabla 5.23.

Tabla 5.23 Intervalo de valores de limo+arcilla calculados, correspondientes a cada etapa evolutiva.

Etapa	limo+arcilla (%)	Perfiles representativos	Desarrollo
I	0-30	Chis, Tall, Tal, 63	escaso
II	30-50	14, 110, Si2, Si1, Si3, 6	moderado
III	50-60	Jal, 2, 3	fuerte
IV	>60	16, 15	muy fuerte

5.6 Factores formadores y las etapas de desarrollo

Por otro lado, se han evaluado los valores de los índices calculados para los factores formadores y su influencia en el desarrollo del suelo, expuestos en el capítulo IV y que corresponden a cada término de la matriz de Phillips (1993b). A tales índices se les ha denominado como universales, ya que pueden ser aplicados a todos los órdenes de suelo. Al igual que el modelo de regresión lineal ha arrojado cuatro etapas de desarrollo para los suelos, con los valores de los índices se proponen también cuatro etapas evolutivas, a cada una de las cuales les corresponde un intervalo, obtenido a través de la caracterización de los perfiles. Asimismo, se les ha asignado un valor paramétrico, del 1 al 4, para contar con datos de más fácil correlación. Los intervalos propuestos son los siguientes para cada índice seleccionado:

5.6.1 Índices universales

a_{11} Desarrollo relativo del perfil

Por horizontes

DRP	valor paramétrico	desarrollo
< 10	1	escaso
10-25	2	moderado
25-35	3	fuerte
> 35	4	muy fuerte

Por perfil completo

DRP	valor paramétrico	desarrollo
< 30	1	escaso
30-60	2	moderado
60-90	3	fuerte
> 90	4	muy fuerte

Por perfil completo (valores ponderados)

DRP	valor paramétrico	desarrollo
< 10	1	escaso
10-15	2	moderado
15-20	3	fuerte
> 20	4	muy fuerte

a_{13} Densidad de cobertura vegetal

DCV	valor paramétrico	desarrollo
< 20	1	escaso
20-50	2	moderado
50-70	3	fuerte
> 70	4	muy fuerte

a_{14} Profundidad del suelo: horizonte A, epipedón y horizonte

prof. (cm)	valor paramétrico	desarrollo
< 40	1	escaso
40-100	2	moderado
100-150	3	fuerte
> 150	4	muy fuerte

a_{15} Profundidad del suelo incluyendo el horizonte Cw (con horizontalización)

prof. (cm)	valor paramétrico	desarrollo
< 70	1	escaso
70-125	2	moderado
125-180	3	fuerte
> 180	4	muy fuerte

5.6.2 Índices que dependen de la vegetación

a_{31} Descomposición de la materia orgánica (en condiciones údico-ústicas)

IDMO	valor paramétrico	desarrollo
0-1.5	1	escaso
1.5-3.0	2	moderado
3.0-4.5	3	fuerte
> 4.5	4	muy fuerte

5.6.3 Índices que dependen del clima

a_{21} Indice de lluvia de lavado

Ln	valor paramétrico	desarrollo
< 40	1	escaso
40-80	2	moderado
80-140	3	fuerte
> 140	4	muy fuerte

a_{21} Indice de agresividad climática

Agcl	valor paramétrico	desarrollo
< 20	1	escaso
20-30	2	moderado
30-40	3	fuerte
> 40	4	muy fuerte

a_{23} Indice de crecimiento vegetal

ICV	valor paramétrico	desarrollo
< 20	1	escaso
20-40	2	moderado
40-60	3	fuerte
> 60	4	muy fuerte

a_{25} Indice de alteración mineral

AIml	valor paramétrico	desarrollo
< 10	1	escaso
10-20	2	moderado
20-30	3	fuerte
> 30	4	muy fuerte

5.6.4 Índices que dependen del relieve

a_{41}Pendiente

Pend (%)	valor paramétrico	desarrollo
> 30	1	escaso
30-15	2	moderado
15-6	3	fuerte
< 6	4	muy fuerte

a_{42} Drenaje climático

Drcl	valor paramétrico	desarrollo
< 500	1	escaso
500-1000	2	moderado
1000-1500	3	fuerte
> 1500	4	muy fuerte

5.6.5 Índices que dependen del material parental

a_{51} Indice de intemperismo (Parker)

Parker	valor paramétrico	desarrollo
> 40	1	escaso
40-25	2	moderado
25-15	3	fuerte
< 15	4	muy fuerte

a_{61} Relación sílice/aluminio

Sa	valor paramétrico	desarrollo
> 4.5	1	escaso
4.5-3.0	2	moderado
3.0-1.0	3	fuerte
< 1.0	4	muy fuerte

a_{61} Indice de lixiviación

Lix	valor paramétrico	desarrollo
> 0.95	1	escaso
0.95-0.65	2	moderado
0.65-0.35	3	fuerte
< 0.35	4	muy fuerte

Algunos índices analizados no proporcionaron información valiosa, como es el caso del índice de degradación biológica, asociado a la degradación de la materia orgánica, el tipo de vegetación por área de cobertura (CoVer), la densidad de cobertura vegetal y el factor K de erodabilidad, los cuales no mostraron un patrón definido en cuanto al desarrollo del suelo. En general, los índices asociados a los organismos son de difícil evaluación, ya que no reflejan claramente su influencia en la evolución del perfil, a pesar de ser un factor muy importante en los suelos. Por ello, resulta conveniente investigar más a fondo qué clase de índices pudieran ser utilizados en el modelo, para completar e incorporar todos los elementos de la matriz.

5.7 Tendencias evolutivas de los perfiles

En la tabla 5.24 se muestran los valores de los índices obtenidos para cada perfil, los cuales corresponden con los valores paramétricos que se muestran en la tabla 5.25. La interpretación de los resultados para cada perfil es la siguiente:

Vitrandic Udorthent (Chis). Este suelo muestra un desarrollo escaso de acuerdo a su contenido calculado de limo+arcilla (19.32, tabla 5.23) y evidenciado por su valor de DRP, profundidad del suelo e índices de Parker, Sa y Lix (Fig. 5.15a). Sin embargo, por sus condiciones climáticas, se espera que este perfil evolucione rápidamente alcanzando su máximo desarrollo en poco tiempo y constituyendo un suelo que caiga en el orden Andisol, dentro de los Hapludands.

Typic Ustorthent (Tall). El desarrollo que muestra es escaso, con un contenido de limo+arcilla calculado de 19.52 (tabla 5.23). Este perfil evoluciona muy lentamente y, por lo mismo, el tiempo que tardará en alcanzar su máximo desarrollo es muy largo, tal como lo evidencian los factores formadores, ligeramente favorecido por la pendiente (Fig. 5.15b). Tanto el material parental como el clima juegan un papel muy importante en la evolución, pues atenúan

fuertemente la velocidad de formación del suelo y es probable que no se llegue a constituir propiamente un Andisol, sino que derive a un Inceptisol con horizonte cámbico (Typic Eutrochrept y que ya se presentan en el área, como es el caso del Typic Eutrochrept (Tal)).

Typic Eutrochrept (Tal). El desarrollo que muestra es escaso, con un contenido de limo+arcilla calculado de 19.72 (tabla 5.23). Dicho desarrollo es consecuencia de la acción del material parental y el clima los cuales frenan los procesos pedogenéticos. Sin embargo, a diferencia del caso anterior, la pendiente y la temperatura, que favorece la degradación de la materia orgánica, permiten que los procesos sean ligeramente más rápidos (Fig. 5.15c). Este suelo evoluciona muy lentamente y, por lo mismo, el tiempo que tardará en alcanzar su máximo desarrollo es muy largo y, al igual que en el caso anterior, probablemente no llegue a constituirse un Andisol, sino que se espera permanezca muy estable, ubicándose en el mismo orden en el que actualmente se encuentra y dentro del mismo Gran Grupo: Typic Eutrochrept.

Typic Ustivitrand (63). Muestra un desarrollo escaso (tabla 5.26), con un contenido de lim+arc calculado de 29.82 (tabla 5.23). La evolución en este perfil es lenta como consecuencia de la naturaleza del material parental (tobas ácidas) y el clima que tiende a ser bastante seco, tal como lo evidencian los índices correspondientes (Fig. 5.15d). Es muy probable que este suelo evolucione hacia un Mollisol, quizá, hacia un Andic Haplustoll.

Lithic Udivitrand (14). El desarrollo que muestra es moderado, ubicándose en la etapa II (tabla 5.26) con un contenido de limo+arcilla calculado de 36.39 (tabla 5.23), con una velocidad de evolución también moderada. Esto se debe a que, por una parte, el clima, la vegetación y, en parte, el relieve, favorecen su desarrollo, acelerando los procesos, y por la otra, el material parental los frenan. La tendencia que lleva este suelo es hacia la distrificación, tal como lo marca el valor del índice de lixiviación (Fig. 5.15e), de tal forma que puede llegar a constituir Andisoles con características dístricas, y a la larga, inclusive, desarrollar propiedades óxicas: Oxic Hapludand.

Typic Udivitrand (Si3). El desarrollo que muestra es moderado, con un contenido de limo+arcilla calculado de 43.15 (tabla 5.23), Los factores formadores, al igual que en el caso anterior, actúan intensamente, favoreciendo la velocidad de desarrollo, (Fig. 5.15i), aunque el material parental constituye un factor limitante. Como en los casos anteriores, este suelo, después de constituir un Andisol (Hapludand), su evolución lo llevará a un Andic Haplumbrept.

Typic Udivitrand (6). El desarrollo que muestra es moderado, con un contenido de limo+arcilla calculado de 47.67 (tabla 5.23), Los factores formadores, al igual que en el caso anterior, actúan intensamente, favoreciendo la velocidad de desarrollo, (Fig. 5.15j). Este es un suelo complejo que lleva una evolución conjunta con un suelo sepultado, formado en fases volcánicas previas. Su evolución se

espera sea en la línea de los Inceptisoles con propiedades ándicas (Andic Haplumbrept).

Typic Fulvudand (110). El suelo muestra un desarrollo moderado, ya que posee un contenido de limo+ arcilla calculado de 38.84 que lo ubica en la etapa III (tabla 5.26). A pesar de que los factores formadores inciden fuertemente, su evolución se ve disminuída por la presencia de compuestos organo-minerales que le proporcionan una alta estabilidad al suelo (Fig. 5.15f). Por esta razón es que, quizá, este perfil evolucione hacia suelos isohúmicos, de acuerdo a la clasificación francesa (Duchaufour, 1984), de los cuales no existe un equivalente en la clasificación americana.

Typic Hapludand (Si2). El desarrollo que muestra es moderado, con un contenido de limo+arcilla calculado de 40.56 (tabla 5.23). Los factores formadores, clima y relieve, actúan intensamente, favoreciendo una evolución rápida (Fig. 5.15g). Sin embargo, el material parental atenúa esta dinámica, disminuyendo la intensidad de los procesos. El suelo al que se dirige la evolución es un Inceptisol con propiedades ándicas: Andic Haplumbrept.

Typic Hapludand (Si1). El desarrollo que muestra es moderado, con un contenido de limo+arcilla calculado de 41.71 (tabla 5.23), Los factores formadores, al igual que en el caso anterior, actúan intensamente, favoreciendo la velocidad de desarrollo, (Fig. 5.15h), aunque el material parental constituye un factor limitante. Este suelo se dirige hacia un Inceptisol con propiedades ándicas: Andic Haplumbrept.

Typic Hapludand (Jal). Este suelo muestra un desarrollo fuerte, ubicándose en la etapa III (tabla 5.26), con un contenido de limo+arcilla calculado de 55.15 (tabla 5.23). Puede señalarse que los factores que más favorecen su desarrollo son el material parental, el clima y la vegetación, mientras que el relieve es un factor limitante, marcándose una tendencia hacia la distrificación. La velocidad de desarrollo se considera que es rápida (Fig. 5.15k), evolucionando hacia Inceptisoles dístricos y, posteriormente, a Ultisoles, quizá constituya un Typic Hapludult.

Eutric Hapludand (2). Este suelo posee un fuerte desarrollo, con un contenido de limo+arcilla de 56.73, que lo ubica en la etapa III (tabla 5.23), aunque por su profundidad se ubicaría en la etapa IV (Fig. 5.15l). El clima y la vegetación parecen ser limitantes en el desarrollo, en tanto que el relieve y el material parental lo favorece. Se considera que la velocidad de formación es moderada y su tendencia evolutiva es, primeramente a Inceptisoles eútricos y, porteriormente, a Alfisoles con propiedades ándicas (Andic Hapludalf).

Typic Hapludand (3). Este suelo también posee un fuerte desarrollo, con un contenido de limo+arcilla de 58.41 (tabla 5.23), que lo ubica en la etapa III (tabla 5.26), aunque por su DRP y profundidad se ubicaría en la etapa IV (Fig. 5.15 m).

Sin embargo, parcialmente el clima y la vegetación parecen ser limitantes en el desarrollo, en tanto que, al igual que en el caso anterior, el relieve y el material parental lo favorecen. Se considera que la velocidad de formación es moderada, con una evolución hacia Inceptisoles dístricos y, posteriormente, a Ultisoles, constituyendo un Typic Hapludult.

Eutric Hapludand (15). Este es el perfil de mayor desarrollo, con un contenido de limo+arcilla de 62.77, que lo ubica en la etapa IV (tabla 5.23), favorecido por la acción conjunta de los factores formadores que propician una evolución muy rápida (Fig. 5.15ñ), de una manera muy semejante al anterior. Por lo mismo, se espera que se forme un Oxic Hapludand y, posteriormente, un Typic Hapludult.

Typic Hapludand (16). Este suelo muestra un desarrollo fuerte, con un contenido de limo+arcilla calculado de 61.35 (tabla 5.23), ubicándose en la etapa IV (tabla 5.26). Los factores formadores actúan conjuntamente, favoreciendo una evolución rápida. Este perfil lleva una marcada tendencia a la distrificación, tal como lo marca el índice de lixiviación (Fig. 5.15n). Este perfil ya muestra propiedades óxicas incipientes, por lo que su evolución se dirige hacia un Oxic Hapludand y, posteriormente, hacia grupos de Ultisoles: Typic Hapludults.

En resumen, la velocidad de formación de los suelos estudiados se ilustra de la siguiente forma (tabla 5.26):

Los perfiles de Tala (Tal y Tall) son suelos que van a alcanzar su máxima evolución en un tiempo muy largo y, quizá, nunca lleguen a constituirse como Andisoles.

El Typic Ustivitrand (perfil 63), muestra una velocidad de pedogénesis lenta que lo lleva al desarrollo de suelos con propiedades mólicas, dentro de los grandes grupos de Andic Haplustolls. Por su parte, el Typic Fulvudand (perfil 110), a pesar de mostrar un desarrollo moderado, y presentar factores formadores que podrían acelerar los procesos, se considera que su evolución será lenta por la alta estabilidad que poseen sus componentes.

Los suelos Eutric Hapludand (perfil 2) y Typic Hapludand (perfil 3) tienen una velocidad de formación moderada, encontrándose en el mismo estadío de desarrollo, pero cuya dirección evolutiva divergente, ya que mientras el perfil 2 muestra una marcada tendencia a la eutrificación, el perfil 3 posee características dístricas. Así, como se ha señalado que el perfil 2 es un intergrado hacia un Andic Hapludalf, mientras que el 3 puede derivar en un Typic Hapludult.

Tabla 5.24. Valores de los índices relacionados con los factores formadores.

Perfil	a_{11}	a_{13}	a_{14}	a_{15}	a_{21}	a_{21}	a_{23}	a_{25}	a_{31}	a_{32}	a_{41}	a_{42}	a_{51}	a_{51}	a_{51}
	DRP*	DCV	prof ** suelo	prof Cw	Agcl cm	Ln	ICV	Alml	C/N	IDMO	pend. %	Drecli mm	Parker*	Sa*	Lix*
Chis	3.85	1	0	21	40.49	358.62	155.68	86.91	1.00	5.3	7.5	40.23	43.15	5.19	0.99
Tall	5.36	20	40	70	15.41	35.98	13.70	7.99	0.86	4.5	12.5	-23.69	44.15	6.39	1.06
Tal	10.31	50	60	120	15.41	35.98	13.70	7.99	1.10	4.5	7.5	-39.48	44.15	6.29	1.27
63	8.3	70	63	125	7.63	18.99	31.55	3.31	0.11	3.1	6	8.03	5.59	31.16	
14	15.95	80	40	47	45.27	265.74	91.39	67.76	13.70	5.4	18.0	122.51	27.36	4.95	0.30
6	4.5	80	20	40	113.52	107.13	154.97	19.16	15.00	3.1	10	-0.05	2.81		
Si3	6.5	80		200	46.03	292.64	165.54	71.77	7.99	5.1	5	82.16	4		
110	9.48	80	106	150	46.79	319.54	239.70	75.78	12.00	4.8	15.0	177.69	10.98	2.68	
Si1	5.15	80	60	200	46.03	292.64	165.54	71.77	8.38	5.1	7.5	32.86	3.5		
Si2	6.70	80	50	200	46.03	292.64	165.54	71.77	7.99	5.1	5	49.29	3.2		
15	15.86	50	65	100	45.27	265.74	91.39	67.76	12.00	5.4	10.0	220.52	33.34	3.10	0.15
2	18.64	40	160	200	30.41	144.60	11.73	15.60	9.50	1.5	5.2	194.00	48.45	1.91	0.94
3	20.32	60	150	180	30.41	144.60	11.73	15.60	8.90	1.5	15.0	67.25	25.83	2.20	0.60
Jal	17.27	80	217	250	18.11	15.15	57.29	16.39	11.83	3.9	18.1	31.13	5.92	2.03	0.79
16	17.61	70	130	180	46.03	292.64	165.54	71.77	11.70	5.1	3.0	811.77	7.42	1.37	0.04

* Valores ponderados. ** horizonte A. epipedón y horizonte B.

Tabla 5.25. Valores paramétricos de los índices relacionados con los factores formadores.

Perfil	a_{11}	a_{13}	a_{14}	a_{15}	a_{21}	a_{21}	a_{23}	a_{25}	a_{31}	a_{32}	a_{41}	a_{42}	a_{51}	a_{51}	a_{51}
	DRP	DCV	prof suelo	prof Cw	IAgcl	Ln	ICV	Ialml	C/N	IDMO	pend.	Dre cli	Parker	Sa	Lix
Chis	1	1	1	4	4	4	4	1	4	3	2	3	4	1	1
Tall	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	1	3	4	1	1
Tal	2	2	2	1	1	1	1	1	3	3	1	3	4	1	1
63	1	2	2	1	1	1	1	1	3	4	1	2	1		
14	3	1	1	4	4	4	4	3	4	2	2	2	1	3	3
6	1	2	2	4	2	3	2	3	3	3	3		3		
Si3	1	2	2	4	4	4	4	2	4	4	3		2		
110	1	3	3	4	4	4	4	3	4	2	4	4	3		
Si1	1	2	2	4	4	4	4	2	4	3	3		2		
Si2	1	2	2	4	4	4	4	2	4	4	3		2		
15	3	2	2	4	4	4	4	3	4	3	3	2	2	4	4
2	3	4	4	3	3	1	2	2	1	4	2	1	3	1	1
3	4	4	4	3	3	1	2	2	1	2	1	2	3	2	2
Jal	3	4	4	2	1	4	2	3	3	2	1	4	3	3	3
16	3	3	4	4	4	4	4	3	4	3	4	4	3	4	4

* Valores ponderados. ** horizonte A. epipedón y horizonte B.

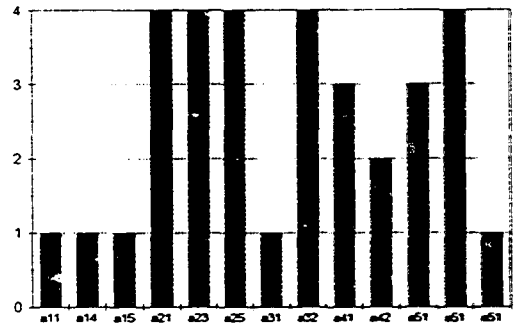
Los suelos Vitrandic Udorthent (Chis), Luthic Udivitrand (14), Typic Udivitrand (Si3), Typic Hapludand (Si1, Si2, Jal, y 16) y Eutric Hapludand (15), a pesar de pertenecer a diferentes etapas de desarrollo, se espera alcancen su máxima evolución en poco tiempo, favorecida, principalmente por el clima, acelerándose o atenuándose los procesos dependiendo de las condiciones de estación locales (relieve y material parental). De estos perfiles, el más joven es el correspondiente a Chis, el cual, sin embargo, está siendo afectado, más agresivamente, por los factores formadores, de tal suerte que puede llegar a constituir un Andisol en muy poco tiempo.

Tabla 5.26. Resumen del desarrollo que muestra cada perfil y la velocidad de pedógenesis

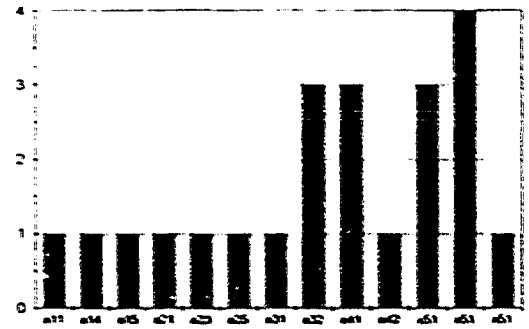
Perfil	Etapa	Desarrollo	Velocidad de pedogénesis	Dirección de evolución[1]	Edad años
Chis	I	Escaso	Muy rápida	Andisol	3
Tall	I	Escaso	Muy lenta	Typic Eutrochrept	95000
Tal	I	Escaso	Muy lenta	Typic Eutrochrept	95000
63	I	Escaso	Lenta	Andic Haplustoll	7500
14	II	Moderado	Rápida	Oxic Hapludand	7500
Si3	II	Moderado	Rápida	Andic Haplumbrept	7500
6	II	Moderado	Rápida	Andic Haplumbrept	5000
110	I	Moderado	Lenta	Suelos isohúmicos[2]	5000
Si2	II	Moderado	Rápida	Andic Haplumbrept	7500
Si1	II	Moderado	Rápida	Andic Haplumbrept	7500
Jal	III	Fuerte	Rápida	Typic Hapludult	5000
2	III	Fuerte	Moderada	Andic Hapludalf	8500
3	III	Fuerte	Moderada	Typic Hapludult	8500
15	III	Fuerte	Rápida	Typic Hapludult	5000
16	IV	Muy fuerte	Rápida	Typic Hapludult	5000

Así, es posible observar que la edad de los depósitos es independiente de la evolución que muestran los perfiles, ya que los más antiguos (Tal y Tall) son los que poseen menor desarrollo. Es por eso que para fines genéticos es más útil contar con la edad evolutiva, que tener datos sobre edades absolutas que nada tienen que ver con el verdadero desarrollo de los suelos.

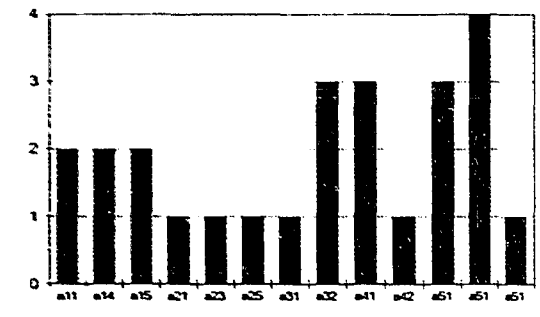
a. Valores paramétricos de desarrollo del perfil Chis



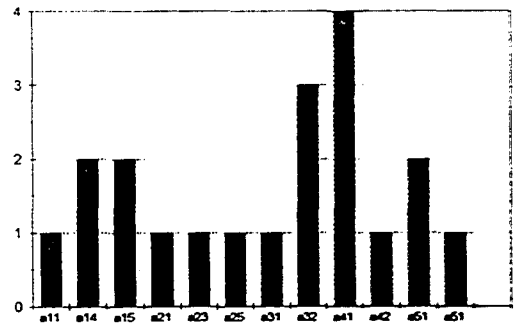
b. Valores paramétricos de desarrollo del perfil Tall



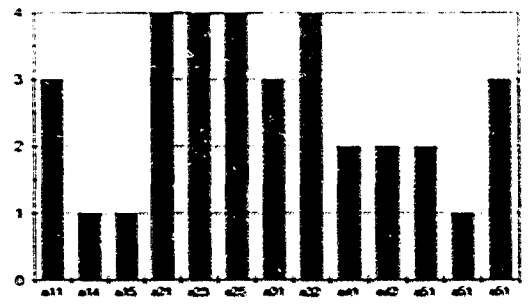
c. Valores paramétricos de desarrollo del perfil Tal



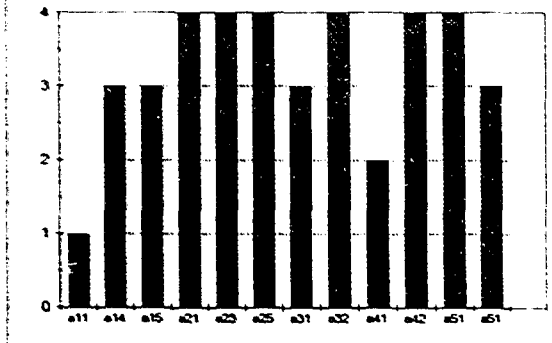
d. Valores paramétricos de desarrollo del perfil 63



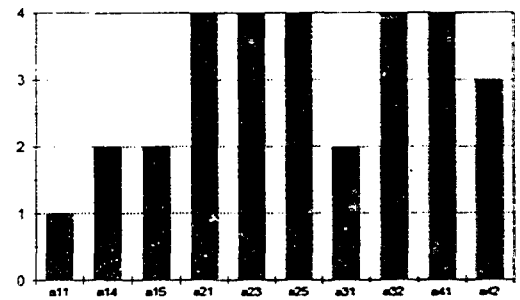
e. Valores paramétricos de desarrollo del perfil 14



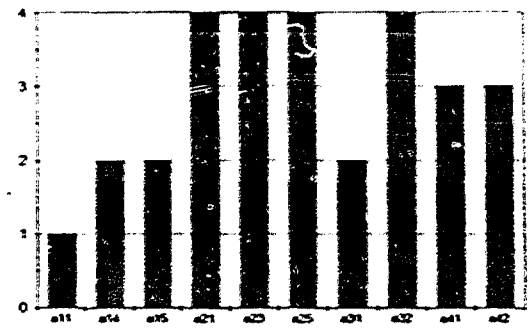
f. Valores paramétricos de desarrollo del perfil 110



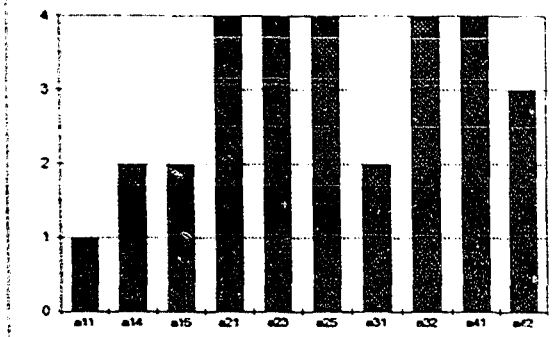
g. Valores paramétricos de desarrollo del perfil Si2



h. Valores paramétricos de desarrollo del perfil Si1



i. Valores paramétricos de desarrollo del perfil Si3



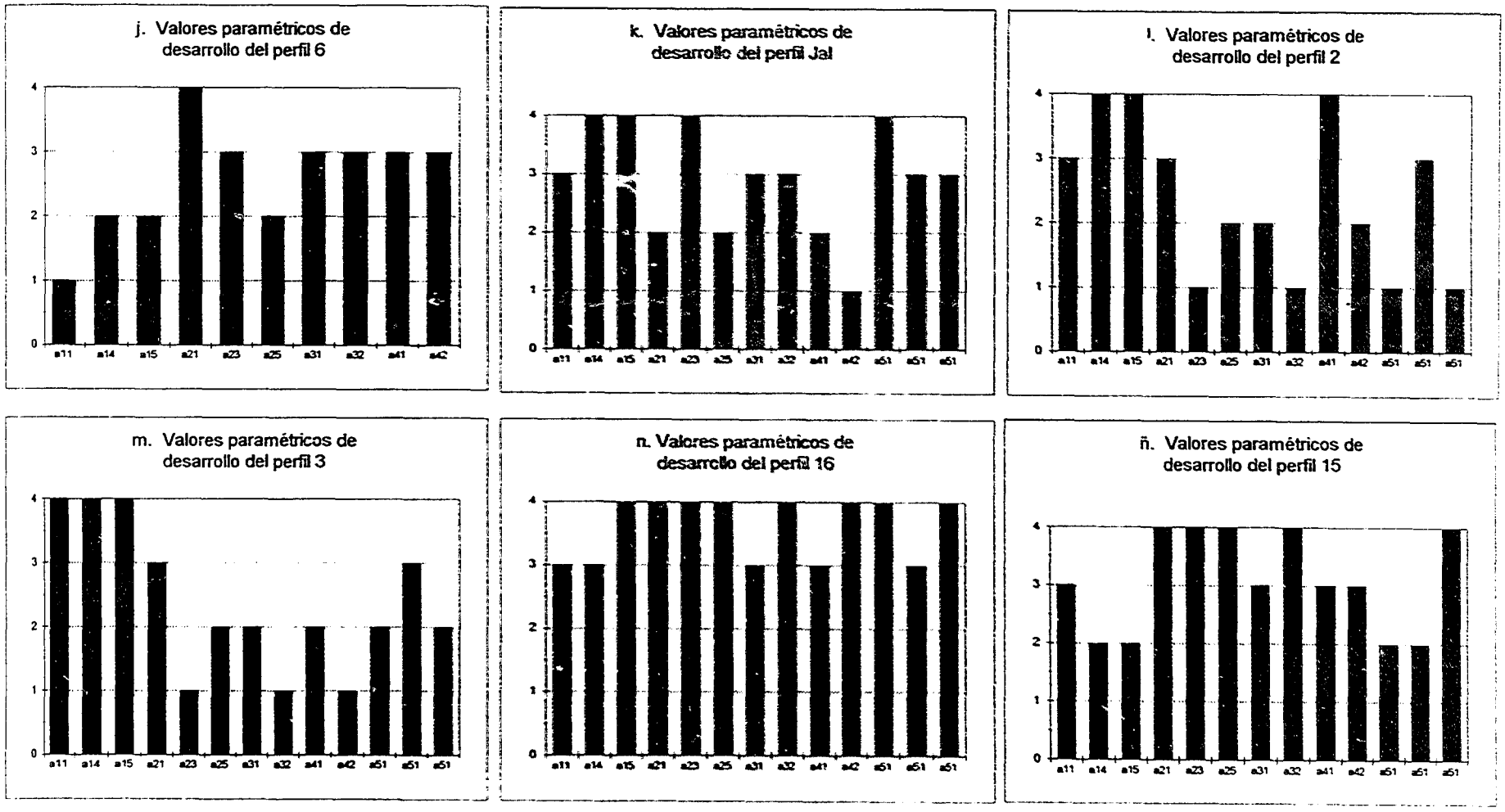


Fig. 5.15. Valores paramétricos que caracterizan a los factores formadores (continuación)

VI CONSIDERACIONES Y CONCLUSIONES

6.1 Consideraciones

A través del trabajo realizado en la presente investigación, se ha obtenido un modelo de regresión lineal múltiple, que indica la etapa de desarrollo de Andisoles y que, conjugando la información procedente de los factores formadores, permite establecer la historia genética del suelo, su comportamiento y tendencia evolutiva. Del análisis efectuado para la obtención del modelo, se han desprendido las observaciones que se enuncian a continuación, las cuales han contribuido al establecimiento de las conclusiones de esta investigación:

1. Se ha elegido un modelo lineal, de regresión múltiple, que, a pesar de no reflejar completamente la realidad, es representativo del fenómeno que se está estudiando. Además posee la ventaja de ser sencillo, y de manejar un número pequeño de variables, lo que lo hace más viable porque ahorra tiempo en la realización de los análisis y, por lo mismo, representa un menor gasto económico y una manera sencilla de conceptualizar el fenómeno.

2. Algunas de las propiedades estudiadas poseen un comportamiento no lineal, sin embargo, se ha considerado trabajar con un modelo lineal debido a que:

a. En las etapas iniciales e intermedias, hasta llegar a la madurez, la tendencia de cambio que llevan dichas propiedades a lo largo del tiempo, son prácticamente lineales.

b. En los Andisoles, los procesos que tienen que ver con la dinámica de la materia orgánica son muy importantes, los cuales son de corta duración, llevando una marcada tendencia lineal hasta que alcanzan su punto de quasiequilibrio.

c. Cuando la tendencia lineal cambia, los Andisoles se encuentran ya en el límite hacia otros órdenes de suelos.

3. Un modelo caracterizado por un sistema de ecuaciones lineales no parece ser el que mejor diagnostica el comportamiento de los Andisoles a nivel subgrupo, porque no describe a los suelos que se encuentran en los niveles taxonómicos inferiores. Esto se debe a que cada uno de ellos se encuentra en diferente estadio evolutivo, en donde los procesos que han actuado, para cada caso, han sido de diferente tipo e intensidad.

4. Consecuentemente, el modelo que mejor puede caracterizar a los Andisoles es aquél que conjuga todos los parámetros relativos a las características del suelo a través de una sola ecuación de regresión.

6.2 Conclusiones

1. De las propiedades analizadas para representar a las variables en el modelo, las que mejor reflejan el desarrollo de los suelos son: la relación sílice/aluminio, la capacidad de retención de humedad a 1500 kPa, la retención de fosfatos y la capacidad de intercambio catiónico, las cuales arrojaron valores del coeficiente de correlación mayores que 0.75, en relación con la secuencia evolutiva establecida para los suelos. Por su parte, el índice de desarrollo relativo (DRP) y la fracción acumulada limo más arcilla arrojaron valores de R^2 de 0.61 y 0.69, respectivamente. A pesar de ello, se tomaron en cuenta para el modelo, dado que el DRP es un índice usado con frecuencia en diversas investigaciones de suelos y paleosuelos; y la fracción limo más arcilla, porque al analizar su comportamiento de cambio con respecto a la edad de los depósitos, se observó un cierto aumento en su proporción, sobre todo en aquellos suelos en donde se presentan condiciones de clima subtropical.

2. De todas las ecuaciones de regresión obtenidas y analizadas, la que mejor refleja el comportamiento de los Andisoles fue aquélla que consideró como variable de respuesta a la suma limo y arcilla, y como variables independientes a la relación sílice/aluminio, la retención de agua a 1500 kPa, la capacidad de intercambio catiónico y la retención de fosfatos.

3. Se eligió la suma limo más arcilla, porque es sabido que un índice de intemperimo en tefras es comúnmente determinado por la cantidad de arcilla formada. Sin embargo, esta estimación se encuentra sujeta a errores, ya que en Andisoles suele ser difícil lograr una dispersión completa de arcilla. Al sumar el contenido de limo más arcilla se puede subsanar este error, al evaluar a los agregados que se forman por una pobre dispersión y que quedan comprendidos en el tamaño del limo.

4. El modelo de regresión obtenido está representado por la ecuación:

$$Y = -3.48 X_1 + 0.32 X_2 + 0.65 X_3 - 0.06 X_4 + 38.43 \qquad (5)$$

donde X_1 Relación sílice/aluminio
X_2 Capacidad de retención de humedad a 1500 kPa
X_3 Capacidad de intervambio catiónico
X_4 Retención de fosfatos

el cual arroja una secuencia evolutiva muy similar a la que previamente se ha establecido, de acuerdo con los datos de los perfiles, con un coefieciente de correlación de 0.75.

De este modo, la secuencia preestablecida es:
Chis->Tall->Tal->63->14->6->Si3->110->Si1->Si2->15->2->3->Jal-> 16

y la secuencia generada por el modelo es:
Chis->Tall-> Tal-> 63-> 14-> 110-> Si2-> Si1-> Si3-> 6-> Jal -> 2-> 3-> 16-> 15

5. De todas las características representadas en el modelo, la relación sílice/aluminio (Sa) influye negativamente en un 77.16%, es decir que a valores más altos de Sa, la suma li+arc disminuye; la capacidad de retención de humedad influye en un 7.10%; la capacidad de intercambio catiónico influye en un 14.41%; y la retención de fosfatos influye negativamente en 1.33%.

6. Se establecen cuatro etapas de desarrollo de los Andisoles, de acuerdo con el contenido estimado de limo + arcilla, los cuales corresponden con: desarrollo escaso, moderado, fuerte y muy fuerte.

7. Por medio de los índices calculados para los factores formadores, se proponen también cuatro etapas evolutivas. Asimismo, se les ha asignado un valor paramétrico, del 1 al 4, para contar con datos de más fácil correlación. Algunos índices analizados no proporcionaron información valiosa, como es el caso del índice de degradación biológica, asociado a la degradación de la materia orgánica, el tipo de vegetación por área de cobertura, la densidad de cobertura vegetal y el factor K de erodabilidad, los cuales no muestran un patrón definido en cuanto al desarrollo del suelo.

En general, los índices asociados a los organismos son de difícil evaluación, ya que no reflejan claramente su influencia en la evolución del perfil, a pesar de ser un factor muy importante en los suelos. Por ello, resulta conveniente investigar más a fondo qué clase de índices pudieran ser utilizados en el modelo.

8. Sin embargo, los índices de alteración y aquéllos relacionados con el clima resultaron de gran utilidad, porque claramente se observa que es posible establecer los intervalos de valores directamente asociados a las etapas de desarrollo.

9. Los suelos estudiados se encuentran en las siguientes etapas de desarrollo:

Los suelos de los perfiles de Tala (Typic Ustorthent y Typic Eutrochrept), que se encuentran en la zona templada y se derivan de tobas ácidas, son suelos que están en la etapa I y van a alcanzar su máxima evolución en un tiempo muy largo y, quizá, nunca lleguen a constituirse como Andisoles. El perfil Chis (Vitrandic Udorthent), localizado en la zona tropical y derivado de cenizas volcánicas andesíticas, está en la etapa I, pero se considera que pronto se ubicará en otro estadio evolutivo, ya que su velocidad de pedogénesis es muy rápida. El perfil 63 (Typic Ustivitrand), presente en la zona subtropical, procedente de cenizas ácidas, está también en la etapa I y muestra una velocidad de pedogénesis lenta

que lo lleva al desarrollo de suelos con propiedades mólicas, dentro de los grandes grupos de Andic Haplustolls. El perfil 110 (Typic Fulvudand), localizado en la zona subtropical, procedente de cenizas ácidas, está en la etapa II y se considera que su evolución es lenta por la alta estabilidad que poseen sus componentes organo-minerales. Los perfiles Si1 (Typic Hapludand), Si2 (Typic Hapludand), Si3 (Typic Udivitrand), 6 (Typic Udivitrand), bajo las mismas condiciones que los anteriores, se encuentran en la etapa II, y se espera que su evolución sea rápida. Los perfiles 2 (Eutric Hapludand y 3 (Typic Hapludand), localizados en la zona templada y derivados de materiales volcánicos básicos, poseen una velocidad de formación moderada, que se encuentran en el mismo estadío de desarrollo (etapa III), pero cuya dirección evolutiva es diferente, ya que mientras el perfil 2 muestra una marcada tendencia a la eutrificación, el perfil 3 posee características dístricas. Así, el perfil 2 es un intergrado hacia un Andic Hapludalf, mientras que el 3 puede derivar en un Typic Hapludult. Los perfiles Jal (Typic Hapludand, etapa III), 14 (Lithic Udivitrand, etapa II), 15 (Typic Hapludand) y 16 (Typic Hapludand, etapa IV), a pesar de pertenecer a diferentes etapas de desarrollo, se espera alcancen su punto máximo en poco tiempo, favorecida, principalmente por el clima (subtropical), acelerándose o atenuándose los procesos dependiendo de las condiciones de estación locales (relieve y material parental).

11. Es posible observar que la edad de los depósitos es independiente de la evolución que muestran los perfiles, ya que los más antiguos (Tal y Tall) son los que poseen menor desarrollo. Es por eso que para fines genéticos es más útil contar con la edad evolutiva, que tener datos sobre edades absolutas que nada tienen que ver con el verdadero desarrollo de los suelos.

12. Por otro lado, si se ve claramente que los perfiles derivados de materiales ácidos muestran una evolución más lenta que, si se conjuga con un clima de poca alterabilidad, da como resultado una velocidad de pedogénesis bastante lenta.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

Aguilera, H.N., 1961. Génesis y clasificación de algunos suelos de la Meseta Tarasca, Michoacán, México. Escuela Nacional de Agricultura, Chapingo, México (folleto técnico No. 1).

Aguilera,H.N., 1963. Algunas consideraciones, características, génesis y clasificación de suelos de Ando. Memorias del 1er. Congreso de la Ciencia del Suelo: 233-240

Aguilera, H.N., 1965. Suelos de Ando, génesis, morfología, clasificación. Series de Investigación No. 6. Colegio de Posgraduados de Chapingo, México.

Aguilera, H.N., 1969. Geographic distribution and characteristics of Volcanic Ash Soil in Meéxico. in Panel sobre suelos derivados de cenizas volc_nicas. Centro de Enseñanza e Investigación. Inst. Interamer. de Cienc. Agr. de la OEA, Turrialba, Costa Rica. p. A. 6.1-A. 6.12.

Aguilera, H.N. et al., 1970. Suelos derivados de cenizas volcánicas y sus relaciones con los Vertisoles. En: Memorias de la Rev. Latinoamericana de Fitotecnia, VIII Reunión Latinoamericano de Fitotecnia, Bogotá, Colombia, p. 122-137.

Aomine, S. and M.L. Jackson, 1959. Allophane determination in Ando soils by cation-exchange capacity Delta value. Soil Scr. Soc. America Proc., 23(3): 210-214.

Aomine, S. and K. Wada, 1962. Differential weathering of volcanic ash and pumice, resulting in formation of hydrated halloysite. Am. Miner., 47:1024-1048.

Arnold, R.W., I. Szbolcs, and V.O. Targulian (Eds.), 1992. Global Soil Change, Report of an IIASA-ISSS-UNEP Task Force on the role of soil in global change. pp. 111.

ASTM-USDA, 1986. Procedures for testing soils. Filadelfia, 225 pp.

Besoain, E., 1985. Mineralogía de arcillas de suelos. San José, Costa Rica. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, IICA/Serie de libros y materiales educativos No. 60. 1216 pp.

Bilzi, A.F. and E.J. Ciolkosz, 1977. A field morphology rating scale for evaluating pedological development. Soil Sci. 12

Birkeland, P.W., 1967. Correlation of soils of stratigraphic importance in Western Nevada and California, and their relative rates of profile development. In Quaternary soils, R.B. Morrison and E. Wright, Jr. (eds), INQUA, VII Congr. Proc., 9:71-91.

Birkeland, P.W., 1984a. Soils and Geomorphology. Oxford University Press, 370 pp.

Birkeland, P.W., 1984b. Holocene soil chronofunctions, Southern Alps, New Zealand. Geoderma, 34:115-134.

Birkeland, P.W., M.N. Machette and K.M Haller, 1991. Soils as a tool for Applied Quaternary Geology. Utah Geological and Mineral Survey, 63 pp.

Blake, G.R. and K.H. Hartge, 1982. Methods of soil analysis. Part I. (2nd. ed.). American SOciety of Agronomy, 150 pp.

Blakemore, L.C., P.L. Searle and B.K. Daly, 1981. Methods for chemical analysis of soils. New Zealand Soil Bureau Scientific Report 10 A. Department of Scientific and Industrial Research, New Zealand..

Bockheim, J.G., 1980. Solution and use of chronofunctions in studying soil development: Geoderma, 24:71-85.

Bouyoucos, G.J., 1955. Directions for making mechanical analysis of soils by the hydrometer method. Soil Sci. Am. Proc. 42:225-230.

Buol, S.W. , F.D. Hole, R.J. McCracken, 1981. Génesis y clasificación de suelos. Ed. Trillas, 417 pp.

Bockheim, J.G., 1980. Solution and use of chronofunctions in studying soil development. Geoderma 24:71-85.

Cajuste, L., 1979. Adsorción de fósforo en algunos suelos de origen volcánico en México y su relación con ciertos componentes de suelos. Agrociencia, México, 36:137-144.

Catt, J.A., 1991. Soils as indicator of Quaternary climatic change in mid-latitudes regions. Geoderma, 51:167-187.

Cochemé, J.J. y A. Demant, 1983. Naturaleza y composición del material emitido por el volcán Chichonal, Chis. El volcán Chichonal, ponencias presentadas en el Simposio sobre el volcán. VI Convención Geológica Nacional. Soc. Geol. Mex.

Colman, S.M., 1982. Chemical weathering of basalts and andesites: Evidence from weathering rinds. US Geol. Surv. Prof. Pap. 1246, 51p.

Cortés, L.A. 1966. Suelos de ando en la República Mexicana. Colegio de Posgraduados, Chapingo, Edo. de México, pp.35

Chessworth, W., 1977. Weathering stages of the common igneous rocks, index minerals and mineral assemblages at the surface of the Earth. J. Soil Sc. 28:490-497.

Childs, C.W. and J.S. Whittan, 1990. A proposed revision of the Key to Mineralogy Classes of Soil Taxonomy (1975). 14th International Congress of Soil Science Transactions Vol. VII, Kyoto, Japan, August, 1990.

Dickson, B.A. and R.L. Crocker, 1954. A chronosequence of soil and vegetation near Mt. Shasta, California. III. Some properties of the mineral soils. J. Soil Sci. 5:173-191.

Dijkmans, J.W.A., J.M. Van Mourik and A.G. Wintle, 1993. Thermoluminiscence dating of aeolian sands from polycyclic soil profiles in the southern Netherlands. Quaternary Research, 40:

Duchaufour, P., 1984. Edafología: Edafogénesis y clasificación. Ed. Masson, 493 pp.

Egawa, T., 1977. Properties of Soil derived from Volcanic Ash. Centro Internacional de Mejoramiento de Maiz y Trigo CIMMyT pp. 1-19.

Etchevers, J.D., 1985. Un cuarto de siglo de investigación en los suelos volcánicos de México. Serie Cuadernos de Edafología, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.

Etchevers, J.D., K. Oleschko and C,M.I. Hidalgo, 1986. Complex nature of the mechanical elements in Andosols from Mexico. In: Transactions XIII Congres of the International Society of Soil Science, 2:55. Hamburgo, Alemania.

FAO, 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de suelos. FAO-PNUMA, Roma, 105pp.

FAO, 1991. World Soil Resources. An explanatory note on the FAO World Soil Resources Map at 1:25 000 000 scale. World Soil Resources Report no. 66. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy, 58 p.

FAO-UNESCO, 1974. Soil Map of the World, 1:5,000,000. Vol. I. Legend. UNESCO, París, Francia..

FAO-UNESCO, 1976. Mapa Mundial de suelos, 1:5,000,000. Vol. III. México y América Central. UNESCO, París, Francia.

FAO-UNESCO-ISRIC, 1988. Soil Map of the World. Revised legend. World Soil Resources Report no. 60. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. 119 p.

FAO- ISSS-ISRIC, 1994. World Reference Base of Soil Resources. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Wageningen/Rome, 161 p.

FitzPatrick, E.A., 1984. Suelos, su formación, clasificación y distribución. De. CECSA, México. 1a. edición en español.

Ford, I., 1984. Dinámica mineral en el suelo: algunos puntos de referencia para su estudio. Univ. Autón. de Chapingo, 578 pp.

Gama, C.J.E., 1996. Los suelos tropicales de México. I Génesis, dinámica y degradación. Tesis de doctorado. Fac. de Ciencias, UNAM (inédito). 420 pp.

Gama, C.J.E., S. Palacios y J. Alcalá, 1990. Estudio edafológico de la Sierra La Primavera, Estado de Jalisco-Edafogénesis y riesgos naturales e inducidos. Contribuciones a la Edafología Mexicana, Univ. Nal. Autón. Méx., pp. 1-24.

García, N.E., 1970. Estudios edafológicos de suelos derivados de cenizas volcáncias del Popocatépetl, Edo. de Puebla. Facultad de Ciencias, UANM. Tesis de Licenciatura.

García, N.E., 1984. Estudio bioquímica, mineralógico y fisicoquímico de diversos Andosoles de México. Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Computense de Madrid, España. Tesis de Doctorado.

Geyh, M.A. and H. Schleicher, 1991. Absolute age determination. Springer Verlag.

Goldich, S.S., 1938. A study in rock weathering. Jour. Geol. 46, p. 17.

Guajardo, R., 1967. Caracterización de algunos suelos de Ando en la Sierra Tarasca. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México. Tesis de Maestría.

Harden, J.W., 1982. A quantitative index of soil development from field descriptions: examples from chronosequence in Central California. Geoderma 28, 1-28.

Hawkins, D.M. and N. Cressie, 1984. Robust kriging- A proposal. Mathematical Geology, 16:3-18.

Heitier, J.M., 1975. Formation et évolution des Andosolsen climat tempéré. Tesis Doc.. Univ. Nancy I, 194 p.

Hütt, G., H. Junger, R. Kujansuu and M. Saarnisto, 1993. OSL and TL dating of buried podsols and overlying sands in Ostrobothnia, western Finland. J. Quaternary Science, 8:125-132.

ICOMAND, 1987. International Committee on the Clasification of Andisols. Circular Letter No. 9, May, 1987.

Jackson, M.L., 1968. Weathering of primary and secondary minerals in soils.Trans. 9th Int. Cong. Soil Sci. 4:281-292.

Jenny, H., 1941. Factors of Soil Formation. McGraw-Hill Book Co. Inc., 281 pp.

Jenny, H., 1980. The Soil Resource: Origin and Behavior. Ecological Studies 37, Springer Verlag, N.Y.

Johnson, D.L. and Rockwell, T.K., 1982. Soil geomorphology: theory, concepts and principles with examples and applications on alluvial and marine terraces in coastal California. Geol. Soc. of Amer. Programs with abstracts 14, 176.

Johnson, D.L. and D. Watson-Stegner, 1987. Evolution model for interpreting Quaternary soils. Quaternary Research, 33:306-9

Kanno, I., 1961. Genesis and classificationo of main genetic soil types in Japan, I. Introduction and Humic Allophane soils. Bull. Kyushu Agr. Exp. Sta., 7-13-185 (In Japanese with English abstract)

Karathanasis, A.D., 1989. Soil solution: a sensitive index of mineral stability in pedogenic environments. In: A. Barto-Kyriakidis, Vol. I Processes. Theophratus Publishing & Propietary Co., S.A. Athens, Greece.

Kimble, J.M. and H. Eswaran, 1988. The Andisol-Oxisol transition. In Proc. Ninth Intern. Soil Classification Workshop, Japan, 20 July to 1 August, 1987. Ed. Kinloch et al., p. 219-232.

Kittrick, J.A., 1969. Soil minerals in the Al_2O_3-SiO_2-H_2O system and a theory of their formation: Clays and Clay Minerals, v. 17, p. 157-167.

Krauskopf, K.B., 1979. Introduction to Geochemistry. Tokio, McGraw Hill, Kogakusha; 617 pp.

Ku, T., W.B. Bull, S.T. Freeman and K.G. Knauss, 1979. Th^{230}-U^{234} dating of pedogenic carbonates in gravelly desert of Vidal Valley, Southeastern California. Bull. Geol. Soc. Amer. 90:1063-1073.

Ling Ong, H., 1969. Correlation between chemical bond and chemical weatherability of the common rock-forming minerals. Soils and tropical weathering. Proc. of the Bandung Symposium.

Lohm, U., 1989. Increased weathering rate in experimental field acidification (short communication). In: A. Barto-kyriakidis (Ed.), I. Processes. Teophratus Publishing & Proprietary Co. S.A., Athens, Greece.

Lugo, H.J., 1988. Elementos de geomorfología aplicada (Métodos cartográficos). Inst. de Geografía, UNAM. México, 128 p.í

Martini, J.A. and C. Luzuriaga, 1989. Classification and productivity of six Costa Rican Andepts. Soil Science 147:326-338.

McDaniel, P.A., M.A. Fosberg and A.L. Falen, 1993. Expression of andic and spodic properties in tephra-influences of northern Idaho, USA. Geoderma, 58:79-94.

Mendenhall, W., R.L. Scheaffer y D.D. Wackerly, 1986. Estadística matemática con aplicalones. Grupo Editorial Iberoamérica. 751 pp.

Miehlich, G., 1980. Los suelos de la Sierra Nevada de México. Fundación Alemana para la Investigación Científica, México. Suplemento Comunicaciones, Proyecto Puebla-Tlaxcala 7.

Millot, G., G. Bockler y H. Pauquet, 1976. Geoquímica y paisajes tropicales. Recista La Reserche, 65: 236-244.

Munsell, 1990. Soil color charts. Munsell Color Co. Inc. Maryland, USA.

Nanzyo, M., S. Shoji, and R. Dahlgren, 1993. Physical characteristics of volcanic ash soils. In Shoji, S., M. Nanzyo and R. Dahlgren (Eds.): Volcanic ash soils. Genesis, properties and utilization. Developments in Soil Science 21:189-207.

Nanzyo, M., R. Dahlgren, and S. Shoji, 1993. Chemical characteristics of volcanic ash soils. In Shoji, S., M. Nanzyo and R. Dahlgren (Eds.): Volcanic ash soils. Genesis, properties and utilization. Developments in Soil Science 21:145-187.

Negendank, J.F.W., R. Emmermann, R. Krawczyc, F. Mooser, H. Tobschall and D. Werle, 1985. Geological and geochemical investigations on the Eastern Transmexican Volcanic Belt. Geof. Int. 24:477-575.

Oleschko, K., 1995. Patrones de estructura de suelos de diversa génesis: base para la modelación de sus propiedades físicas. Conferencia magistral, Simposio Universitario de Edafología, Fac. de Ciencias, UNAM, Resúmenes in extenso, p. 48-53.

Ortiz, C. 1981. Evaluación de la aptitud de las tierras de México para la producción de maíz, frijol y sorgo bajo condiciones de temporal. Colegio de Posgraduados, Chapingo, México.

Otsuka, H., A.A. Briones, N.P. Daquido and F. A. Evangelio, 1988. Characteristics and genesis of volcanic ash soils in the Phillipines. Tech. Bull. Trop. Agric. Res. Cent. Jpn. No. 24.

Paces, T., 1973. Steady-state kinetics and equilibrum between ground water and granitic rock. Geochim. Cosmochim. Acta 2641-2663.

Papadakis, F. 1980. El Clima. Ed. Albatros, Mendoza, Argentina pp. 315.

Parfitt, R.L., 1972. Amorphous material in some Papua New Guinea soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 36:683-686.

Parfitt, R.L., 1990. Soils formed in Tephra in different Climatic Regions. 14th International Congress of Soil Science Transactions Vol. VII, Kyoto, Japan, August, 1990, pp. 134-138.

Parfitt, R.L. and D. Wilson, 1985. Estimation of allophane and halloysite in three sequences of volcanic soils, New Zealand. In: E. Fernandez Caldas and D. Yaalon (Eds.), Volcanic Soils, Catena Supplement 7, Braunschweig, pp. 1-23.

Pèdro, G. 1964. Contribution à l'etude expérimentale de l'alteration géochemique des roches cristallines. Tesis doc. Univ. París. 364 pp.

Pèdro G. and K.E. Bitar, 1966. Contribution to the study of the formation of hypermagnesian soils: experimental investigations of the chemical alteration of ultrabasic rocks (serpentinites). Annls. Agron. 17:611-651.

Petrovic, R., 1976. Rate control in feldspar dissolution. II. The protective effect of precipitates. Geochim. Cosmochim. Acta 40, 1509-1522.

Pettijohn, F.J., 1973. Sedimentary rocks. Harper and ROw Publishers, N.Y.

Phillips, J.D., 1990. Relative ages of wetland and upland surfices as indicated by pedogenic development. Physical Geography 11:363-378.

Phillips, J.D., 1993a. Progressive and regressive pedogenesis and complex soil evolution. Quaternary Research, 40:169-176.

Phillips, J.D., 1993b. Stability implications of the state factor model of soils as a nonlinear dynamical system. Geoderma, 58:1-15.

Quantin, P, 1985. Characterisitcs of the Vanuatu. In: E. Fernandez Caldas and D. Yaalon (Eds.), Volcanic Soils, Catena Supplement 7, Braunschweig, pp. 99-105..

Quantin, P, B. Dabin, A. Bouleau, L. Lulli and D. Bidini, 1985. Characterisitcs and genesis of two Andosols in Central Italy. In: E. Fernandez Caldas and D. Yaalon (Eds.), Volcanic Soils, Catena Supplement 7, Braunschweig, pp. 107-117..

Retallack, G.J., 1984. Completeness of the rock and fossil record: some estimates using paleosols. Paleobiology, 10:59-78.

Retallack, G.J., 1988.Field recognition of paleosols: In Reinhardt, J and W.R. Sigleo (eds), Paleosols and weathering through geologic time; Principles and applications: Special Paper of the Geological SOciety of America, 216:1-20.

Retallack, G.J., 1991. Untangling the effects of burial alteration and ancient soil formation. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 19:183-206.

Retallack, G.J., 1993. The environmental factor approach to the interpretation of paleosols: In Amundson, R., J. Harden and M. Singer (eds), Factors in soil formation; a fiftieth anniversary perspective: Special Publication on the Agronomy Society of America.

Robert, M., 1970. Etude expérimentale de la désagrégation du granite et de l évolution des micas. Tesis Dos., Univ. Paris, 195 pp.

Royle, A.G., 1979. Why geostatistics. Engineering and Mining J., May, 92-99 pp.

Ruhe, R.V., 1965. Quaternary paleopedology. In: H.E. Wright, Jr. and D.G. Frey (Eds.). The Quaternary of the United States. Princeton Univ. Press, Princeton, 922, p. 755-764.

Runge, E.C.A., 1973. Soil development sequences and energy models. Soil Sci, 115:183-193.

Saigusa, M. and S. Shoji, S., 1986. Surface weathering in Zao tephra dominated by mafic glass. Soil Sci. Plant Nutr., 32:617-628.

Saigusa, M., S. Shoji and T. Kato, 1978. Origin and nature of halloysite in Ando soils from Towada tephra, Japan. Geoderma, 20:115-129.

Sánchez, S., 1980. Estudios edafológicos de suelos cafetaleros en la zona volcánica del Municipio de Hueytamalco, Edo. de Puebla. Tesis profesional, Fac. de Ciencias, Univ. Nal. Autón. Méx., 88 pp. (inédito).

SCS-USDA, 1986. Soil Survey Laborahory methods and procedures for collecting soil samples: Washington, D.C:, U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service. 520 pp.

Silva, M.L., 1983. La erupción del volcán Chichonal, Chis. Una particularidad del volcanismo en México. El volcán Chichonal, ponencias presentadas en el Simposio sobre el volcán. VI Convención Geológica Nacional. Soc. Geol. Mex.

Simonson, R.W. and S. Rieger, 1967. Soils of the Andept suborder in Alaska. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 31:692-699.

Singer, A., 1990. Weathering and Soil Formation from Basic Volcanic Rocks under Mediterranean Conditions. 14th International Congress of Soil Science Transactions Vol. VII, Kyoto, Japan, August, 1990, pp. 54-59.

Shoji, S., Y. Suzuki and M. Saigusa, 1987. Clay mineralogical and chemical properties of nonallophanic Andepts (Andisols) from Oregon, USA. Soil Sci. Soc. Am. J., 51:986-990

Shoji, S., T. Hakamada and E. Tomioka, 1990. Properties and Classification of Selected Volcanic Ash Soils from Abashiri, Northern Japan -Transition of Andisols to Mollisols. Soil Sci. Plant Nutr. 36(3):409-423.

Shoji, S., R. Dahlgren and M. Nanzyo, 1993a. Genesis of volcanic ash soils. In Shoji, S., M. Nanzyo and R. Dahlgren (Eds.): Volcanic ash soils. Genesis, properties and utilization. Developments in Soil Science 21:31-71.

Shoji, S., M. Nanzyo, Y. Shirato and T. Ito, 1993b. Chemical kinetics of weathering in young Andisols from Northeastern Japan using soil age normalizad to 10°C. Soil Science, 155:53-60.

Soil Survey Staff, 1990. Keys to Soil Taxonomy. 4th edition. USDA-Soil Taxonomy, 576 pp.

Solleiro R.E., 1992. Evolución, desarrollo y alteración de suelos derivados de rocas basálticas. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, UNAM (inédito).

Soller, D.R. and J.P. Owens, 1991. The use of mineralogic techniques as relative age indicators for weathering profiles of the Atlantic Coastal Plain, USA. Geoderma, 51:11-132.

Souchier, B. and F. Lelong, 1972. Sciences de la Terre, 17(4). 353

Steward, I., 1984. Conceptos de matemática moderna. Alianza Editorial, 2a. Edición, 340 p.

Swindale, L.D., 1965. The properties of soil derived from volcanic ash. Report on the meeting on the classification and correlation of soils from volcanic ash., FAO, Rome, Italy, 82.

Tardy, Y., 1969. Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. Mém. Soc. Carte géol. Als.-Lor 31.

The Third Division of Soils, 1973. Criteria for making soil series and a list of scil series. The first approximation. Nat. Inst. Agr. Res., Japan (in Japanese).

Thornwaite, C.W., 1948. An approach towards the rational classificatiion of climate: Geographical Review, 38:85-94.

Turrent, A., 1962. Estudio de las formas de eliminar el atraso de crecimiento de lechugas cuando se transplantan en invernadero sobre suelos de la Sierra Tarasca. Colegio de Posgraduados, Chapingo, México. Tesis de Maestría (inédito).

Ugolini, F.C., R. Dahlgren, S. Shoji and T. Ito, 1988. An example of andosolization and podzolization as revealed by soil solution studies, Southern Hakkoda, Northeatern Japan. Soil Science 145(2):111.125.

Valera P. M.A., 1993. Fisicoquímica y mineralogía de Andosoles de la región de Teziutlán, Edo. de Puebla. Tesis de Maestría, Fac. de Ciencias. Univ. Nal. Autón. Méx., 295 pp. (inédito).

Van Wanbeke, A., 1991. Soils of the tropics: properties and appraisal. McGraw Hill, Inc. 343pp.

Vreeken, W.J., 1975. Principal kinds of chronosequences and their significance in soil history. J. Soil Sci., 26:378-394.

Wada, K., 1980.Mineralogical characteristics of Andisols. In: K.G. Theng (De.) Soil with variable charge. New Zealand Society of Soil Science, Lower Hutt, pp.87-107.

Wada, K., 1985. The distinctive Properties of Andosols. Springer-Verlag, NY. Advances in Soil Science, Volume 2, pp.173-229.

Wada, K. 1989. Allopahene and imogolite. In: J.B. Dixon y S.B. Weed (eds.) Mineral Soil Environments (second edition). Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wis. USA.

Wakatsuki, T. and A. Rasydin, 1992. Rates of weathering and soil formation. Geoderma, 52:251-263.

Walkley, A. and I.A. Black, 1947. An examination of the Degtharcff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid tritiation method: Soil Science, 3:29-38.

Warketin, B.P. and Maeda, T., 1980. Physical and mechanical characteristics of Andisol. In: B.K.G. Theng (Ed.) Soils with variable charge, New Zealand Society of Soil Science, Soil Bureau, Lower Hutt, New Zealand. pp. 195-224.

Wilde, S.A., 1946. Forest soils and forest growth, Walthur, Chronica Botánica.

Wintle, A.G. and D.J. Huntley, 1982. Thermoluminiscence dating of sediments. Quaternary Sci. Rev. 1:31-53.

Wintle, A.G. N.J. Shackleton and J.P. Lautridou, 1984. Thermoluminiscence dating of periods of loess depositation and soil formation in Normandy. Nature 310:491-493.

Wintle, A.G. and Catt, 1985. Thermoluminiscence dating of soils developed in late Devensian loess at Pegwell Bay, Kent. J. Soil Sci., 36:293-298.

Wollast, R. and L. Chou, 1984. Kinetic study of the dissolution of albite with a continuos flow-through fluidizad bed reactor. In: J.I. Drever (Ed.). The chemistry of weathering. Dordrecht/Boston/Lancaster, Reidel, NATO ASI ser. C149, Reidel, Dordrecht, pp.75-96.

Wright, V.P., 1991. Paleopedology: Stratigraphic relationships and empirical models. In L.P. Martini and W. Chessworth (Eds.): Development in Earth surface processes 2. Weathering soils and paleosols. Elsevier, Amsterdam, pp.475-499.

Yamada, S., 1977. Distribution and Morphology of Soils derived from Volcanic Ash in Japan. Centro Internacional de Mejoramiento de Maiz y Trigo CIMMyT pp. 1-19.

Yong, R.N., A.M.O. Mohamed and B.W. Wang, 1992. Influence of amorphous silica and iron hydroxide on interparticle action and soil surface properties. Can. Geotech. J. 29:803-818.

ANEXOS

ANEXO I

Perfil Chis.

Morfología del perfil.

C_1 0-21 cm. Depósito de ceniza de color gris en húmedo (10YR 5/1). Textura predominantemente arenosa; estructura masiva; sin consistencia en seco y muy friable en húmedo. Reacción moderada a la fenoftaleína; muestra fragmentos de pómez, los cuales constituyen el 20% del volumen total. Contacto claro y plano.

C_2 21-83 cm. Depósito de ceniza de color blanco en húmedo (10YR 8/1). Textura predominantemente arenosa; estructura masiva; sin consistencia en seco y muy friable en húmedo. muestra fragmentos de pómez, líticos y feldespatos. Representa una mezcla de productos de caída aérea y derrames piroclásticos gradados. Estos derrames están formados por fragmentos de pómez (10 cm de diámetro), líticos y bombas (textura fragmental) los cuales constituyen el 20% del volumen total. Contacto claro y plano.

C_3 83-124 cm. Depósito de ceniza de color blanco en húmedo (10YR 8/2). Textura predominantemente arenosa; estructura masiva; sin consistencia en seco y muy friable en húmedo. Derrame piroclástico, constituido por cenizas. Este derrame sobreyace a un suelo arcilloso ferruginoso (Acrisol crómico).

Tabla 1. Propiedades físicas, químicas y descripción morfológica del perfil Chis (Vitrandic Udorthent)

Horizonte	Prof. (cm)	Grava (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Limo/ arcilla	C (%)	N (%)	C/N	Pret (%)	Ret. humedad 15 Bars	MO (%)
C_1	0-21	25	62	12.5	0.5	25.0	0.45	0.02	22.5	2	3.1	1.0
C_2	21-83	38	48	13.7	0.3	45.7	0.22	0.02	11.0	1	2.7	0.5
C_3	83-124	43	50	6.5	0.5	13.0				0	1.6	0.0

Horizonte	DA 33kPa g/cm^3	pH NaF 1N	pH KCl	pH H_2O	pH delta	Suma de cationes (S) meq/100g	CIC (NH_4OAc) (T) cmol(+)/Kg	S/T (%)
C_1	0.75	9.8	6.7	7.1	-0.4	4.0	7.5	53.3
C_2	0.78	9.3	6.4	7.0	-0.4	3.9	6.3	61.9
C_3	0.83	9.0	6.3	6.8	-0.5	2.4	6.0	40.0

Horizonte	Prof. (cm)	Color en húmedo	Textura	Estructura	Películas	Consistencia seco	húmedo	Límite con C
C_1	0-21	10YR 5/1	Arenosa	Masiva	np	suelta	muy friable	Abrupto
C_2	21-83	10YR 8/1	Arenosa	Masiva	np	suelta	muy friable	Abrupto
C_3	83-124	10YR 8/2	Arenosa	sin estructura	np	suelta	friable	

np no presenta

Tabla 2. Valores de desarrollo relativo del perfil (DRP)

Perfil	Horizonte	DRP	Espesor (cm)	Perfil	Horizonte	DRP	Espesor (cm)	Perfil	Horizonte	DRP	Espesor (cm)
2	A	24.0	21	Chis	C_1	8.0	21	6	Ap	9.0	20
	AB	22.5	17		C_2	5.0	62		C		20
	B_{21}	21.5	27		C_3		41		total	9.0	40
	B_{22}	23.5	42		total	13.0	124	63	Ap	17.0	33
	BC	17.0	53	Tal	A	15.0	15		AC	16.0	62
	C		20		B	22.5	45		C		
	total	108.5	180		C		60		total	33.0	125
3	A	19.4	27		total	37.5	120	Si1	A_1	11.0	10
	AB	18.6	18	Tall	A_{11}	13.0	15		A_{12}	6.0	20
	B_{21}	23.7	45		A_{12}	13.0	25		A2	10.0	30
	B_{22}	25.5	60		C	5.0	30		C_1	10.0	50
	C		20		CR		55		C_2		90
	total	87.2	170		total	28.0	125		total	37.0	200
14	A	15.0	17	Jal	A_{11}	25.0	10	Si2	A_1	22.0	10
	Bw	21.5	23		A_{12}	20.0	57		A_{11}	12.0	20
	C	9.0	7		B_{12}	20.0	47		A_2	9.0	20
	total	45.5	47		B_{21}	22.0	136		C_1	10.0	70
15	Ah	25.0	13		C		50		C_2		90
	AB	27.0	22		total	87.0	253		total	53.0	200
	B_2	35.0	10	110	A_{11}	22.0	15	Si3	Ap	10.0	90
	Cw		35		A_{12}	23.0	25		C_1	8.0	50
	total	87.0	80		B_{21}	13.0	33		C_2		60
16	Ah	25.0	16		B_{22}	13.0	33		total	18.0	200
	B_1	21.0	29		IIC_1	3.0	44				
	B_2	30.0	46		IIC_2		50				
	B_3	20.0	39		total	74.0	200				
	C		50								
	total	89.0	180								

Perfil Tall.

Morfología del perfil (según datos de Gama et al., 1990)

A_{11} 0-15 cm. Horizonte de color gris claro en húmedo (10YR 7/2), de textura franco-arenosa; estructura en bloques subangulares finos, mal desarrollada; consistencia débil en seco y muy friable en húmedo; poroso; aireado; conductividad hidráulica moderadamente lenta; raíces escasas. Contacto claro.

A_{12} 15-40 cm. Color gris claro en húmedo (10YR 7/2); franco arenosa; estructura en bloques angulares y subangulares finos, débilmente desarrollada; débil en seco y muy friable en húmedo; poroso; aireado; conductividad hidráulica moderadamente lenta; retención de humedad moderada; raíces finas en cantidad moderada; presenta granos de cuarzo gruesos muy numerosos. Contacto abrupto.

C 40-70 cm. Horizonte de color blanco en húmedo (10YR 8/2); franco-arenoso, sin estructura; ligeramente compactado y cementado; consistencia ligeramente dura en seco y friable en húmedo; muy rico en cuarzo.

Tabla 3. Propiedades físicas, químicas y descripción morfológica del perfil **Tall** (Typic Ustorthent)

Horizonte	Prof. (cm)	Grava (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Limo/ arcilla	C (%)	N (%)	C/N	Pret (%)	Ret. humedad 15 Bars	MO (%)
A_{11}	0-15		66	31	3	10.33	0.64	0.05	12.8	2	2.50	0.86
A_{12}	15-40		67	30	3	10.00	0.12	0.01	12.0	1	2.85	1.02
C	40-70		69	28	3	9.33				0	2.60	0.28
CR	70-125		72	26	2	13.00					2.60	0.00

Horizonte	DA 33kPa g/cm^3	pH NaF 1N	pH KCl	pH H_2O	pH delta	Suma de cationes (S) meq/100g	CIC (NH_4OAc) (T) cmol(+)/Kg	S/T (%)
A_{11}	1.30	6.0	4.6	5.0	-0.4	3.00	5.2	57.7
A_{12}	1.35	6.0	4.6	5.0	-0.4	2.45	5.2	47.1
C	1.40	7.0	4.5	5.0	-0.5	2.88	5.1	56.5
CR	1.50	7.0	4.0	5.0	-1.0	2.50	3.3	75.7

Horizonte	Prof. (cm)	Color en húmedo	Textura	Estructura	Películas	Consistencia seco	Consistencia húmedo	Límite con C
A_{11}	0-15	10YR 7/2	Franco arenoso	Bloques subangulares finos; dd	np	débil	muy friable	Claro
A_{12}	15-40	10YR 7/2	Franco arenoso	Bloques angulares, subangulares finos, dd	np	débil	friable	Abrupto
C	40-70	10YR 8/2	Franco arenoso	sin estructura	np	suelta	friable	sin películas
CR	70-125	10YR 8/2	Arenoso	sin estructura	np	liger. duro	friable	

dd débilmente desarrollados; md moderadamente desarrollados; fd fuertemente desarrollados; np no presenta. Datos tomados de Gama et al., 1992

Perfil Tal.

Morfología del perfil (según datos de Gama et al., 1990)

A 0-15 cm. Horizonte de color pardo muy pálido en húmedo (10YR 7/3), de textura franco-arenosa; estructura en bloques angulares finos, mal desarrollada; consistencia débil en seco y friable en húmedo; raíces escasas. Contacto claro.
(B) 15-60 cm. Horizonte de alteración, de color amarillo en húmedo (10YR 7/6); franco arenosa; estructura en bloques angulares, de tamaño medio y fino,

débilmente desarrollada; ligeramente dura en seco y friable en húmedo; ligeramente adhesiva; conductividad hidráulica lenta; escasas raíces finas. Contacto claro e irregular.

C 60-120 cm. Horizonte mineral de textura gruesa, de color blanco en húmedo (10YR 8/2); ligeramente compactado; sin estructura; ligeramente dura en seco y friable en húmedo; moderadamente adhesivo.

Tabla 4. Propiedades físicas, químicas y descripción morfológica del perfil Tal (Typic Eutrochrepts)

Horizonte	Prof. (cm)	Grava (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Limo/ arcilla	C (%)	N (%)	C/N	Pret (%)	Ret. humedad 15 Bars	MO (%)
A	0-15		69	28	3	9.33	0.64	0.05	12.8	2	2.33	1.10
(B)	15-60		64	29	7	4.14	0.12	0.01	12.0	1	2.91	0.21
C	60-120		75	23	2	11.5				0	2.30	0.07

Horizonte	DA 33kPa g/cm^3	pH NaF 1N	pH KCl	pH H_2O	pH delta	Suma de cationes (S) meq/100g	CIC (NH_4OAc) (T) cmol(+)/Kg	S/T (%)
A	1.15	6.0	5.5	6.0	-0.5	5.29	6.1	86.8
(B)	1.17	6.0	6.4	6.9	-0.5	6.20	6.4	96.8
C	1.35	7.0	5.6	6.2	-0.6	2.55	4.0	63.7

Horizonte	Prof. (cm)	Color en húmedo	Textura	Estructura	Películas	Consistencia seco	Consistencia húmedo	Límite con C
A	0-15	10YR 7/3	Franco arenoso	Bloques angulares, medianos, finos; dd	np	débil	friable	Claro
(B)	15-60	10YR 7/6	Franco arenoso	Bloques angulares, medianos, finos; dd	delgadas zonales	débil	friable	Claro
C	60-120	10YR 8/2	Arenoso	sin estructura	np	liger. duro	friable	

dd débilmente desarrollados; md moderadamente desarrollados; fd fuertemente desarrollados; np no presenta
Datos tomados de Gama et al., 1992

Perfil 63.

Morfología del perfil (según los datos de Valera, 1993)
Ap 0-30 cm. Horizonte úmbrico de color pardo oscuro en húmedo (10YR 3/3), de textura franca arenosa; bloques subangulares, de tamaño medio, moderadamente desarrollada; muy friable en húmedo; ligera adhesividad y plasticidad; escasa porosidad fina y aireación; raíces finas frecuentes. Contacto abrupto y ondulado.

AC 30-63 cm. Horizonte de color pardo amarillento en húmedo (10YR 3/6), de textura franca arenosa; estructura en bloques subangulares, de tamaño fino, débilmente desarrollada; muy friable en húmedo; nula adhesividad y plasticidad; moderada porosidad fina y aireación; raíces finas escasas. Presenta una gran cantidad de clastos de pómez alterados, subredondeados. Contacto claro y ondulado.

C 63-125 cm. Horizonte de color negro en húmedo (7.5YR 3/6), textura de arena francosa; estructura masiva; muy friable en húmedo; nula adhesividad y plasticidad; moderada porosidad fina y aireación.

Tabla 5. Propiedades físicas, químicas y descripción morfológica del perfil 63 (Typic Ustivitrands)

Horizonte	Prof. (cm)	Grava (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Limo/ arcilla	C (%)	N (%)	C/N	Pret (%)	Ret. humedad 15 Bars	MO (%)
Ap	0-30		62.7	22.0	15.3	1.44	1.7	0.11	15	60.2	18.5	2.9
AC	30-63		72.7	14.0	13.3	1.05	0.3	0.02	17	58.0	12.3	0.5
C	63-125		87.1	7.3	5.6	1.30				50.0	10.5	

Horizonte	DA 33kPa g/cm^3	pH NaF 1N	pH KCl	pH H_2O	pH delta	Suma de cationes (S) meq/100g	CIC (NH_4OAc) (T) cmol(+)/Kg	S/T (%)
Ap	0.87	9.0	5.1	6.0	-0.9	6.7	21.4	31.31
AC	0.89	9.2	5.2	6.0	-0.8	4.0	14.3	27.97
C	0.87	9.6	5.9	7.0	-1.1	1.4	8.0	17.50

Horizonte	Prof. (cm)	Color en húmedo	Textura	Estructura	Películas	Consistencia seco	Consistencia húmedo	Límite con C
A_{11}	0-30	10YR 3/4	Franco arenosa	bloques subangulares medianos, md	np		muy friable	Abrupto
AC	30-63	10YR 4/6	Franco arenosa	bloques subangulares medianos, dd	np		muy friable	Claro
C_1	63-125	7.5YR 7/6	Arena francosa	Masiva	np		muy friable	

dd débilmente desarrollados; md moderadamente desarrollados; fd fuertemente desarrollados; np no presenta. Datos tomados de Valera., 1993

Perfil 14.

Morfología del perfil

Ah 0-17 cm. Horizonte de color pardo oscuro en húmedo (7.5YR 3/3), de textura migajón arenosa; estructura granular, de tamaño fino, bien desarrollada; suelta en seco y friable en húmedo; alta porosidad y aireación; con una alta densidad de raíces finas. Contacto claro e irregular.

Bw 17-40 cm. Rojo amarillento en húmedo (5YR 4/6); migajón arenoso; estructura en bloques subangulares, de tamaño fino, débilmente desarrollada; posee algunos esqueletanes que evidencian una ligera eluviación de arcilla en las caras de los agregados; suelta en seco y friable en húmedo; ligeramente adhesiva y no plástica; alta porosidad y aireación; posee un porcentaje de 1 a 5% de grava de 10 mm de diámetro. Contacto claro e irregular.

Cw 40-47 cm. Capa no consolidada constituida por vidrio y cenizas volcánicas de color negro (5YR 1/1); texturalmente corresponde con la clase fragmentada (Soil Taxonomy, 1990), en la que se incluye la presencia de grava, partículas de arena muy gruesa y de tierra fina, insuficiente para rellenar los intersticios de 1 mm de diámetro.

Perfil 6.

Morfología del perfil (según los datos de Valera, 1993)

Ap 0-20 cm. Horizonte ócrico de color pardo oscuro en húmedo (10YR 3/3), de textura franca; estructura granular, de tamaño medio, débilmente desarrollada; muy friable en húmedo; ligera adhesividad y plasticidad; alta porosidad fina y aireación.; abundantes raíces finas. Contacto abrupto e irregular.

C 20-40 cm. Horizonte de color negro en húmedo (7.5YR 3.5/4), de textura franca; estructura masiva; muy friable en húmedo; moderada adhesividad y plasticidad; alta porosidad fina y aireación; escasas raíces finas.

Este horizonte sepulta a un horizonte B cámbico, perteneciente a un suelo formado a partir de materiales parentales emitidos en fases previas.

Tabla 6. Propiedades físicas, químicas y descripción morfológica del perfil **14** (Lithic Udivitrands)

Horizonte	Prof. (cm)	Grava (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Limo/ arcilla	C (%)	N (%)	C/N	Pret (%)	Ret. humedad 15 Bars	MO (%)
Ah	0-17	1	60	29	10	2.9	5.63	0.40	14.0	63	14.7	13.7
Bw	17-40	3	50	30	17	1.1	2.70	0.19	14.2	75	12.5	6.8
C	40-47	10	75	10	5	2.0	0.66	0.06	11.0	60	3.7	1.0

Horizonte	DA 33kPa g/cm^3	pH NaF 1N	pH KCl	pH H_2O	pH delta	Suma de cationes (S) meq/100g	CIC (NH_4OAc) (T) cmol(+)/Kg	S/T (%)
Ah	0.75	10.0	6.5	5.4	-1.1	11.3	25.3	44.7
Bw	0.83	9.8	6.5	5.5	-1.0	14.5	20.0	72.5
C	0.92	9.7	6.7	6.1	-0.6	13.0	14.2	91.5

Horizonte	Prof. (cm)	Color en húmedo	Textura	Estructura	Películas	Consistencia seco	Consistencia húmedo	Límite con R
Ah	0-17	7.5YR 3/3	Migajón arenoso	Granular, fina	sin películas	suelta	suelta	Abrupto
Bw	17-40	5YR 4/6	Migajón arenoso	Bloques subangulares, finos; dd	delgadas zonales	suelta	friable	Claro e irregular
C	40-47	5YR 1/1	Fragmen-tada, grava y arena	sin estructura	delgadas zonales	débil	muy friable	Claro
R	>47	5YR 2/2	Muy gruesa	sin estructura	sin películas	suelta	suelta	

dd débilmente desarrollados; md moderadamente desarrollados; fd fuertemente desarrollados

Tabla 7. Propiedades físicas, químicas y descripción morfológica del perfil 6 (Typic Hapludands)

Horizonte	Prof. (cm)	Grava (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Limo/ arcilla	C (%)	N (%)	C/N	Pret (%)	Ret. humedad 15 Bars	MO (%)
A_{11}	0-20		43.6	52.0	4.4	11.82	3.9	0.26	15	72.3	28.0	6.8
C_1	20-40		55.1	34.0	10.9	3.11	0.2	0.01	13	63.4	22.7	0.4

Horizonte	DA 33kPa g/cm^3	pH NaF 1N	pH KCl	pH H_2O	pH delta	Suma de cationes (S) meq/100g	CIC (NH_4OAc) (T) cmol(+)/Kg	S/T (%)
A_{11}	0.69	10.5	4.2	5.0	-0.8	6.4	21.3	30.04
C_1	0.79	10.0	5.2	6.0	-0.8	9.2	25.0	36.80

Horizonte	Prof. (cm)	Color en húmedo	Textura	Estructura	Películas	Consistencia seco	Consistencia húmedo	Límite con C
A_{11}	0-20	10YR 3/4	Franco limosa	granular mediana, dd	np		muy friable	Claro
C_1	20-40	10YR 3/4	Franco arenosa	Masiva	np		muy friable	

dd débilmente desarrollados; md moderadamente desarrollados; fd fuertemente desarrollados; np no presenta. Datos tomados de Valera., 1993

Perfil Si3.

Morfología del perfil (según los datos de Sánchez, 1980)

Ap 0-90 cm. Horizonte de color pardo grisáceo muy oscuro en húmedo (10YR 3/2), de textura migajón arenosa; estructura en bloques subangulares, de tamaño fino, fuerte a moderadamente desarrollada; blando en seco, muy friable en húmedo; moderada adhesividad y ligera plasticidad; alta porosidad gruesa y aireación. Presenta un esqueleto formado por gravas redondeadas de rocas ígneas y gravas angulares derivadas de areniscas y lutitas. Contacto abrupto

C_1 90-140 cm. Horizonte de color pardo amarillento oscuro en húmedo (10YR 5/6), de textura migajón arenosa; estructura en bloques subangulares, de tamaño fino, débilmente desarrollada; blando en seco, muy friable en húmedo; ligera adhesividad y plasticidad; porosidad gruesa. Presenta un esqueleto formado por gravas redondeadas de rocas ígneas. Contacto abrupto.

C_2 140-200 cm. Pardo en húmedo (7.5YR 5/4); migajón arcilloso; estructura casi suelta con algunos bloques subangulares, de tamaño fino, débilmente desarrollados; muy blanda en seco y friable en húmedo; ligera adhesividad y plasticidad; alta porosidad fina y aireación; presenta un esqueleto formado por gravas de naturaleza ígnea.

Perfil 110.

Morfología del perfil (según los datos de Valera, 1993)

A_{11} 0-15 cm. Horizonte de color pardo muy oscuro en húmedo (10YR 2/1), de textura franca; estructura en bloques subangularers, de tamaño medio, débilmente desarrollada; friable en húmedo; ligera adhesividad y plasticidad; alta porosidad fina y aireación. Contacto claro e irregular.

A_{12} 15-40 cm. Horizonte de color pardo oscuro en húmedo (10YR 2/1), de textura franca; estructura en bloques subangulares, de tamaño medio, débilmente desarrollada; friable en húmedo; moderada adhesividad y plasticidad; alta porosidad fina y aireación. Contacto abrupto e irregular.

B_{12} 40-73 cm. Pardo amarillento en húmedo (10YR 5/6); franco limoso; estructura en bloques subangulares, de tamaño medio, débilmente desarrollada; muy friable en húmedo; fuerte adhesividad y plasticidad; alta porosidad fina y aireación. Contacto claro e irregular.

B_{22} 73-106 cm. Pardo claro amarillento en húmedo (10YR 6/4); franco; estructura en bloques subangulares, de tamaño medio, débilmente desarrollada; friable en húmedo; fuertemente adhesivo y plástico. Contacto abrupto e irregular.

IIC_1 106-150 cm. Amarillo rojizo en húmedo (7.5YR 8/6); franco limoso; estructura masiva; friable en húmedo; consistencia fuertemente adhesiva y plástica. Límite claro y ondulado.

IIC_2 106-150 cm. Amarillo rojizo en húmedo (7.5YR 8/6); migajón arcilloso; estructura masiva; consistencia fuertemente adhesiva y plástica.

Tabla 8. Propiedades físicas, químicas y descripción morfológica del perfil **SI3** (Typic Udivitrand)

Horizonte	Prof. (cm)	Grava (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Limo/ arcilla	C (%)	N (%)	C/N	Pret (%)	Ret. humedad 15 Bars	MO (%)
Ap	0-90		57.6	29.6	12.8	2.31				68	25.0	0.99
C_1	90-140		58.8	24.4	16.8	1.45				55	20.0	0.98
C_2	140-200		33.2	36.0	30.8	1.17				35	12.0	0.13

Horizonte	DA 33kPa g/cm^3	pH NaF 1N	pH KCl	pH H_2O	pH delta	Suma de cationes (S) meq/100g	CIC (NH_4OAc) (T) cmol(+)/Kg	S/T (%)
Ap	0.70		5.5	6.4	-0.9	2.88	29.64	9.71
C_1	0.76		5.1	5.8	-0.7	2.40	20.52	11.70
C_2	0.75		4.2	5.8	-1.6	5.32	11.78	45.16

Horizonte	Prof. (cm)	Color en húmedo	Textura	Estructura	Peliculas	Consistencia seco	húmedo	Límite con C
Ap	0-90	10YR 3/2	Migajón arenoso	Bloques subangulares finos; fd-md	np	blanda	muy friable	Abrupto
C_1	90-140	10YR 5/6	Migajón arenoso	Bloques subangulares finos; dd	np	blanda	muy friable	Abrupto
C_2	140-200	7.5YR 5/4	Migajón arcilloso	Masiva; bloques subangulares	np	muy blanda	friable	

dd débilmente desarrollados; md moderadamente desarrollados; fd fuertemente desarrollados; np no presenta
Datos tomados de Sánchez, 1980

Tabla 9. Propiedades físicas, químicas y descripción morfológica del perfil **110** (Typic Fulvudands)

Horizonte	Prof. (cm)	Grava (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Limo/ arcilla	C (%)	N (%)	C/N	Pret (%)	Ret. humedad 15 Bars	MO (%)
A_{11}	0-15		45.7	32.3	22.0	5.55	7.0	0.54	13	86.9	25.00	12.0
A_{12}	15-40		40.7	47.3	12.0	3.91	7.2	0.55	13	86.0	24.00	12.5
B_{21}	40-73		37.3	52.7	10.0	2.18	0.7	0.04	16	70.5	18.00	1.2
B_{22}	73-106		30.2	48.5	21.3	2.68	0.3			70.0	15.00	0.5
IIC_1	106-150		17.5	65.4	17.1	2.68	0.6			70.0	15.00	1.0
IIC_2	150-200		14.1	71.2	14.7	5.18	0.6			70.0	15.00	0.9

Horizonte	DA 33kPa g/cm^3	pH NaF 1N	pH KCl	pH H_2O	pH delta	Suma de cationes (S) meq/100g	CIC (NH_4OAc) (T) cmol(+)/Kg	S/T (%)
A_{11}	0.50	11.5	4.0	4.8	-0.8	9.8	35.8	27.37
A_{12}	0.54	11.5	4.0	5.1	-1.1	11.0	35.8	30.73
B_{21}	0.74	10.8	4.8	5.6	-0.6	5.3	16.0	33.13
B_{22}	0.77	10.8	5.4	4.4	-1.0	4.3	10.5	40.95
IIC_1	0.83	10.8	3.8	5.0	-1.2	3.4	10.3	33.01
IIC_2	0.91	10.0	4.2	5.2	-1.0	3.4	6.1	55.74

Horizonte	Prof. (cm)	Color en húmedo	Textura	Estructura	Películas	Consistencia seco húmedo		Límite con C
A_{11}	0-15	10YR 2/1	Franca	Bloques subangulares medianos, dd	np		friable	Claro
A_{12}	15-40	10YR 2/1	Franca	Bloques subangulares medianos, dd	np		friable	Abrupto
B_{21}	40-73	10YR 5/6	Franca limosa	Bloques subangulares medianos, dd	np		muy friable	Claro
B_{22}	73-106	10YR 6/4	Franca limosa	Bloques subangulares medianos, dd	np		friable	Abrupto
IIC_1	106-150	7.5YR 8/6	Franca limosa	Masiva	np		friable	
IIC_2	150-200	7.5YR 8/6	Franca limosa	Masiva	np			

dd débilmente desarrollados; md moderadamente desarrollados; fd fuertemente desarrollados;
np no presenta
Datos tomados de Valera, 1993

Perfil Si1.

Morfología del perfil (según los datos de Sánchez, 1980)

A_1 0-10 cm. Horizonte de color pardo grisáceo muy oscuro en húmedo (10YR 3/2), de textura arena migajosa; estructura granular, de tamaño medio, moderadamente desarrollada; débil en seco, friable en húmedo; ligera adhesividad y plasticidad; alta porosidad fina y aireación. Contacto claro e irregular.

A_{12} 10-30 cm. Horizonte de color pardo oscuro en húmedo (10YR 4/3), de textura migajón arenosa; estructura en bloques subangulares, de tamaño medio, fuertemente desarrollada; moderadamente débil en seco, friable en húmedo; ligera adhesividad y plasticidad; alta porosidad fina y aireación. Contacto claro e irregular.

A_2 30-60 cm. Pardo amarillento oscuro en húmedo (10YR 4/4); migajón arenoso; estructura en bloques subangulares, de tamaño fino, fuertemente desarrollada; moderadamente débil en seco y friable en húmedo; moderada adhesividad y plasticidad; alta porosidad fina y aireación. Contacto claro e irregular.

C_1 60-110 cm. Pardo oscuro en húmedo (10YR 3/4); migajón arenoso; estructura en bloques subangulares, de tamaño medio, fuertelmente desarrollada; fligeramente dura en seco y friable en húmedo; ligeramente adhesivo y plástico. Contacto abrupto e irregular.

C_2 110-200 cm. Pardo amarillento oscuro en húmedo (7.5YR 4/4); migajón arcillo-arenoso; estructura masiva; consistencia suelta en seco y en húmedo.

Tabla 10. Propiedades físicas, químicas y descripción morfológica del perfil **Si1** (Typic Hapludands)

Horizonte	Prof. (cm)	Grava (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Limo/ arcilla	C (%)	N (%)	C/N	Pret (%)	Ret. humedad 15 Bars	MO (%)
A1	0-10		74	20	6	3.33				74	32.50	8.38
A_{12}	10-30		68	24	8	2.20				70	30.00	5.00
A_2	30-60		68	14	18	0.90				70	25.00	1.60
C_1	60-110		74	18	8	1.88				70	22.00	0.85
C_2	110-200		76	10	14	0.67				70	20.00	0.30

Horizonte	DA 33kPa g/cm^3	pH NaF 1N	pH KCl	pH H_2O	pH delta	Suma de cationes (S) meq/100g	CIC (NH_4OAc) (T) cmol(+)/Kg	S/T (%)
A1	0.82		4.6	5.4	-0.8	9.0	30.3	29.70
A_{12}	0.78		4.5	5.4	-0.9	6.0	24.0	25.00
A_2	0.80		4.2	5.2	-1.0	4.0	21.1	18.96
C_1	0.80		4.9	5.7	-0.8	2.5	18.7	13.37
C_2	0.82		4.2	5.5	-1.3	2.5	13.6	18.38

Horizonte	Prof. (cm)	Color en húmedo	Textura	Estructura	Películas	Consistencia seco	Consistencia húmedo	Límite con C
A1	0-10	10YR 3/2	Arena migajosa	Granular, moderada, mediana	np	débil	friable	Claro
A_{12}	10-30	10YR 4/3	Migajón arenoso	Bloques subangulares finos, fd	np	moder débil	friable	Claro
A_2	30-60	10YR 4/4	Migajón arenoso	Bloques subangulares finos; fd	np	moder débil	friable	Claro
C_1	60-110	10YR 3/4	Migajón arenoso	Bloques subangulares finos; md	np	lig. duro	firme	Abrupto
C_2	110-200	7.5YR 4/4	Migajón arcillo-arenoso	Masiva	np	suelto	suelta	

dd débilmente desarrollados; md moderadamente desarrollados; fd fuertemente desarrollados; np no presenta

Datos tomados de Sánchez, 1980

Perfil Si2.

Morfología del perfil (según los datos de Sánchez, 1980)

A_1 0-10 cm. Horizonte de color negro en húmedo (10YR 2/1), de textura migajón arenosa; estructura granular, de tamaño medio, moderadamente desarrollada; dura en seco, friable en húmedo; ligera adhesividad y plasticidad; alta porosidad fina y aireación. Contacto gradual e irregular.

A_{11} 10-30 cm. Horizonte de color negro en húmedo (10YR 3/4), de textura migajón arcillo-arenosa; estructura en bloques subangulares, de tamaño fino, fuertemente desarrollada; dura en seco, friable en húmedo; ligera adhesividad y plasticidad; alta porosidad fina y aireación; presenta un esqueleto formado por gravas de naturaleza ígnea. Contacto abrupto.

A_2 30-50 cm. Pardo oscuro en húmedo (7.5YR 4/4); migajón arcillo-arenoso; estructura en bloques subredondeados, de tamaño fino, fuertemente desarrollada; dura en seco y friable en húmedo; ligera adhesividad y plasticidad; alta porosidad fina y aireación; presenta un esqueleto formado por gravas de naturaleza ígnea. Contacto claro e irregular.

C_1 50-120 cm. Pardo en húmedo (7.5YR 5/4); migajón arcilloso; estructura en bloques subangulares, de tamaño fino, fuertemente desarrollada; suelta en seco y friable en húmedo; ligeramente adhesivo y plástico; porosidad fina; presenta un esqueleto formado por gravas de naturaleza ígnea. Contacto claro e irregular.

C_2 120-200 cm. Amarillo rojizo en húmedo (7.5YR 7/7); migajón arcillo-arenoso; estructura masiva; consistencia suelta en seco y en húmedo.

Tabla 11. Propiedades físicas, químicas y descripción morfológica del perfil **Si2** (Typic Hapludands)

Horizonte	Prof. (cm)	Grava (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Limo/ arcilla	C (%)	N (%)	C/N	Pret (%)	Ret. humedad 15 Bars	MO (%)
A1	0-10		58	22	20	1.10				74	33.30	7.99
A_{11}	10-30		52	22	36	0.89				70	28.40	3.30
A_2	30-50		46	28	26	1.08				70	22.00	1.00
C_1	50-120		30	30	40	0.88				70	21.00	0.38
C_2	120-200		40	30	30	0.68				70	18.00	0.26

Horizonte	DA 33kPa g/cm^3	pH NaF 1N	pH KCl	pH H_2O	pH delta	Suma de cationes (S) meq/100g	CIC (NH_4OAc) (T) cmol(+)/Kg	S/T (%)
A_1	0.80		4.0	4.3	-0.3	5.5	32.0	17.19
A_{12}	0.84		3.9	4.6	-0.7	4.0	30.0	13.33
A_2	0.88		4.0	4.9	-0.9	3.0	28.0	10.71
C_1	0.92		3.9	5.0	-1.1	3.0	12.0	25.00
C_2	0.92		4.2	4.7	-0.5	1.5	10.0	15.00

Horizonte	Prof. (cm)	Color en húmedo	Textura	Estructura	Películas	Consistencia seco	Consistencia húmedo	Límite con C
A_1	0-10	10YR 2/1	Migajón arenoso	Granular, mediana, md	np	dura	friable	Abrupto
A_{12}	10-30	10YR 3/4	Migajón arcillo-arenoso	Bloques subangulares finos; fd	np	dura	friable	Abrupto
A_2	30-50	7.5YR 4/4	Migajón arcillo-arenoso	Bloques subredon-deados, finos fd	np	dura	friable	Claro
C_1	50-120	7.5YR 5/4	Migajón arcilloso	Bloques subangulares finos; fd	np	suelto	friable	Claro
C_2	120-200	7.5YR 7/7	Migajón arcillo-arenoso	Masiva	np	suelto	suelta	

dd débilmente desarrollados; md moderadamente desarrollados; fd fuertemente desarrollados; np no presenta

Datos tomados de Sánchez, 1980

Perfil 15.

Morfología del perfil

Ah 0-20 cm. Horizonte de color pardo oscuro en húmedo (7.5YR 3/2), de textura migajón limosa; estructura granular, de tamaño fino, bien desarrollada; débil en seco y friable en húmedo; consistencia ligeramente adhesiva y plástica; tixotropismo acentuado; alta densidad de raíces finas; poroso y bien aireado. Contacto claro e irregular.

AB 20-33 cm. Pardo oscuro en húmedo (7.5YR 3/2); textura limosa; estructura en bloques angulares, de tamaño medio, moderadamente desarrollada; ligeramente dura en seco y firme en húmedo; ligeramente adhesiva y plástica; presenta tixotropismo; con una alta densidad de poros y raíces finos. Contacto claro e irregular.

B_2 33-65 cm. Horizonte iluvial pardo rojizo oscuro en húmedo (5YR 3/3); migajón limoso; estructura en bloques angulares, de tamaño grueso, fuertemente desarrollada; extremadamente dura en seco y friable en húmedo; adhesivo y plástico; débil tixotropismo; con una alta densidad de poros finos y raíces medias y gruesas, así como tubos de anélidos y larvas. Es rico en minerales intemperizables y vidrio volcánico muy alterado (30%). Contacto abrupto.

Cw 65-100 cm. Horizonte mineral regolítico constituido por cenizas y piroclastos alterados con tamaños que varían de 0.5 mm a 12 mm, de color pardo claro en húmedo (7.5YR 6/4); textura limosa; sin estructura; en ocasiones cementada débilmente, lo que le confiere dureza en seco, pero suelta en húmedo; raíces escasas.

IIC 10-150. Capa sepultada.

Tabla 12. Propiedades físicas, químicas y descripción morfológica del perfil 15 (Eutric Hapludands)

Horizonte	Prof. (cm)	Grava (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Limo/ arcilla	C (%)	N (%)	C/N	Pret (%)	Ret. humedad 15 Bars	MO (%)
Ah	0-20		28	48	24	2.00	5.75	0.45	12.7	55	33.3	12.0
AB	20-33		25	49	26	1.88	2.85	0.23	12.4	50	35.8	5.7
B_2	33-65		25	55	20	2.75	2.67	0.20	13.3	60	45.6	5.5
Cw	65-100		65	34	1	34.00	0.39	0.05	7.8	60	15.1	1.2

Horizonte	DA 33kPa g/cm^3	pH NaF 1N	pH KCl	pH H_2O	pH delta	Suma de cationes (S) meq/100g	CIC (NH_4OAc) (T) cmol(+)/Kg	S/T (%)
Ah	0.71	10.5	5.8	6.8	-1.0	54.5	59.7	91.29
AB	0.75	10.2	6.5	7.3	-0.8	57.0	60.3	94.52
B_2	0.80	10.0	6.5	7.4	-0.9	57.6	61.5	93.65
Cw	0.85	10.0	6.4	7.6	-1.2	28.6	30.3	94.38

Horizonte	Prof. (cm)	Color en húmedo	Textura	Estructura	Películas	Consistencia seco	Consistencia húmedo	Límite con C
Ah	0-20	7.5YR 2/2	Migajón limoso	Granular, fina; fd	sin películas	débil	friable	Abrupto
AB	20-33	7.5YR 3/2	Migajón limoso	Bloques angulares medianos, fd	delgadas zonales	dura	firme	Abrupto
B_2	33-65	5YR 1/2	Migajón limoso	Bloques angulares gruesos; fd	delgadas discontínuas	extr. dura	friable	Abrupto
Cw	65-100	7.5YR 6/4	Limosa	sin estructura	sin películas	dura	suelta	Abrupto

dd débilmente desarrollados; md moderadamente desarrollados; fd fuertemente desarrollados

Perfil 2.

Morfología del perfil (según datos de Solleiro, 1992).

A 0-21 cm. Horizonte ócrico de color pardo rojizo muy oscuro en húmedo (5YR 3/2), de textura franca; estructura migajosa, de tamaño fino, bien desarrollada; dura en seco y muy friable en húmedo; fuerte tixotropismo; alta porosidad y aireación; con una alta densidad de raíces finas. Contacto claro e irregular.

AB 21-38 cm. Pardo en húmedo (7.5YR 4/4); franco; estructura en bloques subangulares, de tamaño fino, bien desarrollada; extremadamente dura en seco y firme en húmedo; ligeramente adhesiva y plástica; fuerte tixotropismo; alta porosidad y aireación; con una alta densidad de poros y raíces finos. Contacto gradual e irregular.

B_{21} 38-65 cm. Pardo rojizo muy oscuro en húmedo (7.5YR 4/4); migajón limoso; estructura en bloques subangulares, de tamaño fino y muy fino, moderadamente desarrollada; extremadamente dura en seco y muy friable en húmedo; ligeramente adhesiva y plástica; fuerte tixotropismo; alta porosidad y aireación; con una alta densidad de poros y raíces finos. Contacto claro e irregular.

B_{22} 65-107 cm. Pardo amarillento en húmedo (7.5YR 5/6); migajón limoso; estructura en bloques subangulares, de tamaño medio y fino, con fuerte desarrollo; consistencia extremadamente dura en seco y friable en húmedo; ligeramente adhesiva y plástica; fuerte tixotropismo. Contacto transicional e irregular.

BC 107-160 cm. Presenta propiedades contrastadas: un moteado con colores abigarrados, predominantes pardo, pardo amarillento, pardo oscuro, en húmedo (7.5YR 4/4, 7.5YR 5/6, 10YR 4/2); migajón limoso; estructura en bloques subangulares, fina, con fuerte desarrollo; extremadamente dura a blanda en seco, y friable a extremadamente firme en húmedo; muy débil tixotropismo; contacto abrupto.

C >160 cm. Color pardo amarillento en húmedo (7.5YR 5/6); migajón limoso; sin estructura; consistencia suelta.

Tabla 13. Propiedades físicas, químicas y descripción morfológica del perfil 2 (Eutric Hapludands)

Horizonte	Prof. (cm)	Grava (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Limo/ arcilla	C (%)	N (%)	C/N	Pret (%)	Ret. agua 15 Bars (%)	MO (%)
A	0-21		45	29	26	1.12	4.16	0.30	13.86	85	33.2	9.5
AB	21-38		35	45	20	2.25	3.65	0.23	15.87	87	33.3	7.8
B_{21}	38-65		26	50	24	2.08	2.20	0.15	14.67	92	37.7	4.7
B_{22}	65-107		26	55	19	2.89	1.15	0.08	14.38	92	40.0	2.5
BC	107-160		32	50	18	2.77	0.96	0.04	24.00	95	22.5	2.0
C	>160		40	42	18	2.33	--	--	--	85	16.3	

Horizonte	DA 33kPa g/cm^3	pH NaF 1N	pH KCl	pH H_2O	pH delta	Suma de cationes (S) meq/100g	CIC (NH_4OAc) (T) cmol(+)/Kg	S/T (%)
A	0.83	11.3	5.3	5.7	-0.4	24.4	38.5	63.4
AB	0.85	11.5	5.5	6.2	-0.7	25.4	37.8	67.2
B_{21}	0.87	11.2	5.5	6.6	-1.1	29.4	37.4	78.6
B_{22}	0.87	11.1	5.4	6.6	-1.2	31.1	33.1	93.9
BC	0.89	10.3	5.6	6.7	-1.1	24.1	25.3	95.3
C	0.92	9.7	5.6	6.9	-1.3	20.0	20.9	95.7

Horizonte	Prof. (cm)	Color en húmedo	Textura	Estructura	Películas	Consistencia seco	Consistencia húmedo	Límite con C
A	0-21	5YR 3/2	Franca	Migajosa. fina fd	Sin películas	Dura	muy friable	Abrupto
AB	21-38	7.5YR 4/4	Franca	Bloques subangulares, finos; fd	Delgadas, zonales	muy dura	firme	Abrupto
B_{21}	38-65	7.5YR 4/4	Migajón limoso	Bloques subangulares, fina, muy fina, md	Delgadas zonales	extr. dura	muy friable	Abrupto
B_{22}	65-107	7.5YR 5/6	Migajón limoso	Bloques subangulares, medianos, finos; fd	Delgadas continuas	extr. dura	friable	Abrupto
BC	107-160	7.5YR 4/4 10YR 4/2 7.5YR 5/6	Migajón limoso	Bloques subangulares, finos; fd	Sin películas	Blanda extr. dura	friable extr. firme	Abrupto
C	>160	7.5YR 5/6	Migajón limoso	sin estructura	Sin películas	suelta	suelta	

Datos tomados de Solleiro, 1992
dd débilmente desarrollados; md moderadamente desarrollados; fd fuertemente desarrollados

Perfil 3.

Morfología del perfil (datos tomados de Solleiro, 1992).

A 0-27 cm. Horizonte ócrico de color pardo rojizo muy oscuro en húmedo (5YR 3/1), de textura franca; estructura granular, de tamaño fino, bien desarrollada; consistencia suelta tanto en seco como en húmedo; alta porosidad y aireación; con una alta densidad de raíces finas. Contacto transicional.

AB 27-45 cm. Pardo rojizo en húmedo (5YR 4/6); franco; estructura en bloques angulares, de tamaño medio y fino, bien desarrollada; ligeraamente dura en seco y firme en húmedo; ligeramente adhesiva y plástica; fuerte tixotropismo; alta porosidad; alta densidad de raíces finas. Contacto claro e irregular.

B_{21} 45-90 cm. Pardo en húmedo (7.5YR 4/4); migajón arcillo-arenoso; estructura en bloques angulares, de tamaño medio y fino, fuertemente desarrollada; extremadamente dura en seco y friable en húmedo; ligeramente adhesiva y plástica; fuerte tixotropismo; alta porosidad. Contacto transicional.

B_{22} 90-150 cm. Pardo en húmedo (7.5YR 4/4); franco; estructura en bloques angulares, de tamaño medio y fino, con fuerte desarrollo; consistencia extremadamente dura en seco y muy friable en húmedo; ligeramente adhesiva y plástica. Contacto transicional e irregular.

C >150 cm. Pardo oscuro en húmedo (7.5YR 5/6); migajón arenoso; sin estructura; sin consistencia.

Tabla 14. Propiedades físicas, químicas y descripción morfológica del perfil 3 (Typic Hapludands)

Horizonte	Prof. (cm)	Grava (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Limo/ arcilla	C (%)	N (%)	C/N	Pret (%)	Ret. humedad 15 Bars	MO (%)
A	0-27		42	35	23	1.52	4.21	0.30	14.0	90	32.7	8.9
AB	27-45		45	32	23	1.39	2.80	0.20	14.0	90	33.2	4.5
B_{21}	45-90		50	25	25	1.00	1.45	0.10	12.1	90	34.2	2.8
B_{22}	90-150		52	29	19	1.53	0.80	0.05	16.0	87	30.0	1.2
C	>150		55	32	13	2.46	0.25	0.02	12.5	80	28.0	0.7

Horizonte	DA 33kPa g/cm^3	pH NaF 1N	pH KCl	pH H_2O	pH delta	Suma de cationes (S) meq/100g	CIC (NH_4OAc) (T) cmol(+)/Kg	S/T (%)
A	0.82	10.5	4.7	5.2	-0.5	15.2	45.0	33.8
AB	0.83	10.9	4.7	5.4	-0.7	15.6	40.3	38.8
B_{21}	0.85	10.9	5.0	5.5	-0.5	18.1	35.2	51.4
B_{22}	0.85	9.8	5.1	5.7	-0.6	18.2	30.8	59.1
C	0.87	9.7	5.1	5.8	-0.7	14.2	24.3	58.4

Tabla 14 (continuación)

Horizonte	Prof. (cm)	Color en húmedo	Textura	Estructura	Películas	Consistencia seco	Consistencia húmedo	Límite con C
A	0-27	5YR 3/1 5YR 4/6	Franca	Granular, fina fd	sin películas	suelta	suelta	Abrupto
AB	27-45	5YR 4/6	Franca	Bloques angulares, medianos, finos; fd	sin películas	liger. dura	firme	Abrupto
B_{21}	45-90	7.5YR 4/4 5YR 4/1	Migajón arcillo-arenoso	Bloques angulares, medianos, finos; fd	delgadas zonales	extr. dura	friable	Abrupto
B_{22}	90-150	7.5YR 4/4	Franca	Bloques angulares, medianos, finos; fd	delgadas continuas	extr. dura	muy friable	Abrupto
C	>150	7.5YR 5/6	Migajón arenoso	sin estructura	sin películas	suelta	suelta	

Datos tomados de Solleiro, 1992
dd débilmente desarrollados; md moderadamente desarrollados; fd fuertemente desarrollados

Perfil Jal.

Morfología del perfil.

A_{11} 0-10 cm. Horizonte de color pardo muy oscuro en húmedo (7.5YR 2/2), de textura migajón arcillo-arenosa; estructura granular, de tamaño medio, bien desarrollada; débil en seco y friable en húmedo; consistencia adhesiva y plástica; alta porosidad y aireación. Contacto claro e irregular.

A_{12} 10-67 cm. Horizonte de color pardo oscuro en húmedo (7.5YR 3/2), de textura migajón arcilloso; estructura en bloques angulares, de tamaño medio, fuertemente desarrollada; ligeramente dura en seco y friable en húmedo; alta porosidad y aireación; con una alta densidad de raíces finas. Contacto abrupto e irregular.

B_{12} 67-114 cm. Pardo fuerte en húmedo (7.5YR 4/6); migajón arenoso; estructura en bloques angulares, de tamaño medio y fino, fuertemente desarrollada; dura en seco y friable en húmedo; alta porosidad y aireación. Contacto gradual e irregular.

B_{21} 114-250 cm. Pardo fuerte en húmedo (7.5YR 4/6); franco; estructura en bloques subangulares, de tamaño medio, fuertemente desarrollada; ligeramente dura en seco y friable en húmedo; moderadamente adhesivo y plástico. Contacto abrupto e irregular.

C >250 cm. Amarillo rojizo en húmedo (7.5YR 8/6); migajón arcilloso; estructura en bloques subangulares muy débilmente desarrollada; ligeramente dura en seco y firme en húmedo; consistencia ligeramente adhesiva y no plástica.

Tabla 15. Propiedades físicas, químicas y descripción morfológica del perfil Jal (Eutric Hapludands)

Horizonte	Prof. (cm)	Grava (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Limo/ arcilla	C (%)	N (%)	C/N	Pret (%)	Ret. humedad 15 Bars	MO (%)
A_{11}	0-10		51.6	26.4	22	1.26	6.35	0.47	13.5	88	32.50	11.8
A_{12}	10-67		43.6	31.4	25	1.02	3.20	0.25	12.8	86	32.00	6.4
B_{12}	67-114		53.6	31.4	15	2.09	2.60	0.20	13.0	85	33.20	1.6
B_{21}	114-250		45.6	34.4	20	1.72	0.80	0.06	13.3	85	34.20	2.7
C	>250		39.6	24.4	36	0.68				82	30.00	0.14

Horizonte	DA 33kPa g/cm^3	pH NaF 1N	pH KCl	pH H_2O	pH delta	Suma de cationes (S) meq/100g	CIC (NH_4OAc) (T) cmol(+)/Kg	S/T (%)
A_{11}	0.65		4.5	5.2	-1.0	15.6	38.3	40.73
A_{12}	0.79		4.2	5.2	-1.0	11.3	36.3	31.13
B_{12}	0.86		4.5	5.1	-0.6	8.0	35.2	22.73
B_{21}	0.89		4.3	5.6	-1.3	8.8	23.5	37.45
C	0.89		3.6	5.2	-1.6	7.5	17.3	43.35

Horizonte	Prof. (cm)	Color en húmedo	Textura	Estructura	Películas	Consistencia seco	húmedo	Límite con C
A_{11}	0-10	10YR 2/2	Migajón arcillo-arenoso	Granular, mediana, fd	delgadas zonales	débil	firme	Abrupto
A_{12}	10-67	7.5YR 3/2	Migajón arcilloso	Bloques angulares, medianos; fd	delgadas discontínuas	ligor. dura	friable	Abrupto
B_{12}	67-114	7.5YR 4/6	Migajón arenoso	Bloques angulares, medianos, finos; fd	moderada-mente espesas discontínuas	dura	friable	Abrupto
B_{21}	114-250	7.5YR 4/6	Franco	Bloques subangulares medianos; fd	moderada-mente espesas discontínuas	dura	friable	Abrupto
C	>250	7.5YR 8/6	Migajón arcilloso	Bloques subangulares dd	sin películas	lig. dura	firme	

dd débilmente desarrollados; md moderadamente desarrollados; fd fuertemente desarrollados; np no presenta

Perfil 16.

Morfología del perfil

Ah 0-16 cm. Horizonte de color pardo oscuro en húmedo (7.5YR 3/2), de textura migajón arcillo-limosa; estructura en bloques subangulares y granular, de tamaño medio y fino, bien desarrollada; ligeramente dura en seco y friable en húmedo; consistencia adhesiva y plástica; alta porosidad y aireación; con una alta densidad de raíces finas. Contacto claro e irregular.

B_1 16-45 cm. Pardo rojizo muy oscuro en húmedo (5YR 3/2); migajón arcillo-limoso; estructura en bloques angulares, de tamaño medio y fino, moderadamente desarrollada; ligeramente dura en seco y friable en húmedo; ligeramente adhesiva y plástica; débil tixotropismo; alta porosidad y aireación; con una alta densidad de poros y raíces finos. Contacto claro e irregular.

B_2 45-91 cm. Pardo rojizo oscuro en húmedo (5YR 3/3); migajón arcillo-limoso; estructura en bloques subangulares, de tamaño medio y fino, moderadamente desarrollada; ligeramente dura en seco y friable en húmedo; moderadamente adhesivo y plástico; débil tixotropismo; con una alta densidad de poros finos y raíces medias y gruesas. Contacto gradual e irregular.

B_3 91-130 cm. Pardo rojizo en húmedo (5YR 4/4); migajón limoso; estructura en bloques subangulares, de tamaño medio y fino, con débil desarrollo; lconsistencia dura, ligeramente compactada en seco y friable en húmedo; ligeramente adhesiva y plástica; débil tixotropismo; presencia de gravas (20% del volumen) muy alteradas y deleznables. Contacto claro e irregular.

Cw 130-180 cm. Capa de color pardo grisáceo en húmedo (10YR 6/2); franca gruesa; estructura en bloques subangulares muy débilmente desarrollada; ligeramente dura en seco y muy friable en húmedo; consistencia ligeramente adhesiva y no plástica; muy débil tixotropismo; porosidad fina abundante y raíces escasas. 50% del volumen está constituído por saprolita.

Tabla 16. Propiedades físicas, químicas y descripción morfológica del perfil 16 (Typic Hapludands)

Horizonte	Prof. (cm)	Grava (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Limo/ arcilla	C (%)	N (%)	C/N	Pret (%)	Ret. humedad 15 Bars	MO (%)
Ah	0-16		15	55	30	1.83	6.35	0.47	13.5	87	45.2	11.7
B_1	16-45		15	50	35	1.42	3.20	0.25	12.8	86	46.0	6.1
B_2	45-91	3	14	50	33	1.51	2.60	0.20	13.0	85	39.7	5.2
B_3	91-130	20	5	60	25	4.00	0.80	0.06	13.3	85	35.1	1.5
Cw	130-180	50	8	40	2	20.0				85	25.2	0.5

Horizonte	DA 33kPa g/cm^3	pH NaF 1N	pH KCl	pH H_2O	pH delta	Suma de cationes (S) meq/100g	CIC (NH_4OAc) (T) cmol(+)/Kg	S/T (%)
Ah	0.72	10.6	5.5	6.1	-0.6	15.6	39.5	39.4
B_1	0.70	10.3	5.6	6.3	-0.7	11.3	36.3	31.1
B_2	0.78	9.9	5.6	6.2	-0.6	8.0	35.7	22.4
B_3	0.85	10.0	5.5	6.1	-0.6	8.8	24.3	36.2
Cw	1.20	10.0	5.2	6.0	-0.8	7.5	18.5	40.5

Horizonte	Prof. (cm)	Color en húmedo	Textura	Estructura	Películas	Consistencia seco	Consistencia húmedo	Límite con C
Ah	0-16	7.5YR 3/2	Migajón arcillo-limoso	Granular, mediana; fd	delgadas zonales	dura	firme	Abrupto
B_1	16-45	5YR 3/2	Migajón arcillo-limoso	Bloques angulares, medianos; md	delgadas discontínuas	liger. dura	friable	Abrupto
B_2	45-91	7.5YR 4/4 5YR 4/1	Migajón arcillo-limoso	Bloques angulares, medianos, finos; fd	moderada-mente espesas discontínuas	dura	friable	Abrupto
B_3	91-130	5YR 4/4	Migajón limoso	Bloques subangulares, medianos; dd	delgadas zonales	dura	friable	Claro
Cw	130-180	10YR 6/2	Franca	Bloaques subangulares dd	sin películas	lig. dura	suelta	

dd débilmente desarrollados; md moderadamente desarrollados; fd fuertemente desarrollados

Tabla 17. Valores de los análisis químicos de óxidos totales de los perfiles

Perfil	Horizonte	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO_2	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	PPI	FeO	total
Chis	C1	53.00	0.50	18.20	1.45	0.22	2.50	9.10	4.40	3.31	0.60	2.25	4.60	100.13
	C2	56.20	0.50	18.10	1.50	0.18	2.45	8.70	4.00	3.50	0.40	0.83	4.10	100.46
	C3	56.30	0.52	18.45	1.39	0.15	2.58	8.70	4.25	3.22	0.32	0.50	3.85	100.23
	ceniza	56.40	0.70	17.76	1.80	0.22	2.56	8.22	4.20	2.90	0.32	0.72	4.20	100.00
Tal[2]	C	65.90	0.43	17.80	1.53	0.07	0.09	0.33	5.31	7.22	0.00	2.30	1.53	100.98
Tall[2]	C	66.31	0.12	17.63	1.35	0.06	0.04	0.27	4.70	5.60	0.00	3.50	1.35	99.58
Toba[2]		73.92	0.11	11.70	1.26	0.04	0.04	0.25	3.82	4.97	0	4.00	0.43	100.11
63	Ap	56.73	1.11	22.21	5.76	0.13	0.56	2.52	2.12	0.45	0.43	7.98		100.00
	AC	64.66	0.66	16.08	4.85	0.05	1.09	2.87	4.25	2.99	0.17	2.09		100.00
6	Ap	38.39	2.27	23.26	11.98	0.18	0.20	1.67	0.05	0.58	0.34	21.08		100.00
14	A	52.00	0.44	19.30	8.60	0.25	3.70	4.20	1.00	0.69		7.50		97.88
	Bw	53.20	0.49	18.10	8.50	0.15	2.70	3.90	1.30	0.30	1.10	8.70		98.44
	C	57.00	0.70	17.00	2.40	0.60	0.50	8.00	1.00	1.60	1.30	8.10		98.20
	R	73.00	0.70	13.00	1.25	0.35	0.20	1.13	0.60	4.80	0.75	3.85		
110[3]	A12	35.6	1.21	19.11	8.19	0.15	0.24	1.36	0.05	0.93	0.34	32.62		100
	B21	35.81	1.52	26.50	9.05	0.05	0.65	0.03	1.24	0.91	0.10	23.54		100
15	Ah	29.00	4.40	21.00	17.80	0.32	4.60	2.61	0.47	0.01	0.75	19.50		100.46
	AB	29.70	4.40	21.90	19.70	0.33	4.95	2.50	0.47	0.35	0.79	15.30		100.39
	B2	29.50	4.40	22.80	20.00	0.29	4.30	2.05	0.47	0.25	0.65	15.50		100.21
	Cw	40.20	4.70	16.50	14.60	0.23	6.70	7.60	1.15	0.96	0.51	7.20		100.35
	R	47.10	4.50	15.00	13.00	0.15	5.80	6.00	0.70	1.80	0.30	5.70		
2[1]	A	26.75	1.47	26.00	14.75	0.90	3.17	6.70	1.60	1.33	1.40	14.25		100.32
	AB	28.14	1.49	27.10	11.20	0.37	4.07	10.00	1.89	1.39	0.97	13.80		100.42
	B21	30.65	1.45	29.90	9.15	0.53	3.40	11.25	2.75	1.90	0.75	9.10		100.63
	B22	33.23	1.43	31.87	8.90	0.27	3.20	10.14	3.10	2.15	0.38	6.09		100.76
	BC	38.80	1.43	32.10	6.40	0.11	2.95	7.33	2.15	0.90	0.10	7.89		100.16
	C	42.75	1.40	31.00	5.95	0.09	2.75	6.90	1.80	0.75	0.15	7.10		100.64
	tefra	44.10	1.40	32.00	5.70	0.08	2.60	5.50	1.50	1.80	0.30	5.00		99.98
3[1]	A	28.90	1.49	21.40	15.15	0.60	1.20	2.90	0.73	1.25	0.75	25.70		100.27
	AB	31.60	1.49	24.80	12.55	0.01	1.60	3.10	0.89	1.40	0.50	22.33		100.27
	B21	34.20	1.49	27.75	9.70	0.02	1.80	3.80	1.00	1.65	0.44	18.30		100.15
	B22	36.90	1.47	28.00	8.60	0.04	1.90	4.00	1.10	1.70	0.37	16.25		100.33
	C	38.70	1.45	29.15	7.50	0.06	2.10	4.70	1.20	1.70	0.35	12.60		99.51
	tefra	44.10	1.40	32.00	5.70	0.08	2.60	5.50	1.50	1.80	0.30	5.00		99.98
Jal	A12	43.20	0.28	35.20	1.60	0.20	0.36	0.75	0.31	0.21	0.79	26.50		109.40
	B12	43.40	0.15	36.58	1.50	0.35	0.18	1.10	0.43	0.42	0.81	21.80		106.72
	B21	43.98	0.16	37.46	1.55	0.31	0.19	1.05	0.46	0.39	0.79	17.80		104.14
	C	44.70	0.29	37.90	0.40	0.28	0.38	1.38	0.51	0.40	0.69	15.80		102.73
	C	46.20	0.26	37.91	0.40	0.36	0.36	1.65	0.61	0.41	0.60	10.80		99.56
16	Ah	20.00	4.50	23.60	20.90	0.60	1.25	0.75	0.08	0.70	1.15	36.50		110.03
	B1	21.00	4.50	30.00	20.10	0.55	1.20	0.45	0.08	0.60	0.92	21.80		101.20
	B2	21.50	4.00	32.00	21.00	0.55	1.35	0.23	0.07	0.53	0.95	17.80		99.98
	B3	25.30	4.00	32.50	19.30	0.45	1.15	0.30	0.35	0.40	0.70	15.80		100.25
	Cw	33.00	4.00	32.70	16.50	0.40	1.40	0.63	0.11	0.37	0.47	10.80		100.38
	R	47.10	4.50	15.00	13.00	0.15	5.80	6.00	0.70	1.80	0.30	5.70		

[1] Tomado de Solleiro. 1992. [2] Tomado de Gama et al.. 1992.
[3] Tomado de Valera. 1993

Tabla 18. Índices de alteración de los perfiles analizados

Perfil	Horizonte	Sa	Ses	Bases	Parker	Lixiv	Fe/Si
Chis	C1	4.95	4.71	1.71	64.52	1.01	0.03
	C2	5.28	5.01	1.65	62.33	1.03	0.03
	C3	5.19	4.95	1.65	62.65	1.04	0.02
	ceniza	5.40	5.07	1.59	59.78	1.00	0.03
Tal	C	6.29	5.97	0.90	56.29	1.27	0.02
Tall	C	6.39	6.10	0.77	46.29	1.06	0.03
	Toba	10.74	10.05	0.93	39.50	1.00	0.02
63	Ap	4.34	3.72	0.37	19.67		0.10
	AC	6.84	5.73	0.90	42.66		0.05
6	Ap	2.81	2.11	0.13	7.51		0.07
14	A	4.58	3.55	0.76	28.54	0.28	0.14
	Bw	5.00	3.85	0.68	24.72	0.29	0.14
	C	5.70	5.23	0.99	33.21	0.43	0.04
	R	9.55	8.99	0.60	26.63	1.00	0.02
110	A12	3.18	2.50	0.16	8.32		0.19
	B21	2.30	1.89	0.17	13.00		0.20
15	Ah	2.35	1.52	0.45	21.63	0.15	0.36
	AB	2.31	1.47	0.46	23.80	0.23	0.40
	B2	2.20	1.41	0.38	20.40	0.21	0.40
	Cw	4.14	2.65	1.06	47.38	0.81	0.27
	R	5.33	3.44	0.99	42.30	1.00	0.22
2	A	1.76	1.28	0.75	44.03	0.56	0.36
	AB	1.77	1.40	0.92	51.44	0.67	0.28
	B21	1.74	1.46	0.95	58.90	1.04	0.23
	B22	1.77	1.50	0.87	58.19	1.27	0.21
	BC	2.05	1.82	0.67	40.63	0.90	0.14
	C	2.34	2.09	0.64	36.73	0.83	0.12
	tefra	2.34	2.10	0.56	35.82	1.00	0.11
3	A	2.30	1.58	0.33	19.41	0.38	0.34
	AB	2.17	1.64	0.37	22.41	0.48	0.28
	B21	2.10	1.71	0.42	26.32	0.60	0.22
	B22	2.24	1.87	0.45	27.79	0.69	0.19
	C	2.26	1.94	0.50	30.59	0.76	0.16
	tefra	2.34	2.10	0.56	35.82	1.00	0.11
Jal	A12	2.09	2.03	0.08	5.24	0.48	0.04
	B12	2.02	1.97	0.10	7.07	0.75	0.03
	B21	2.00	1.94	0.09	6.99	0.78	0.03
	C	2.01	1.99	0.12	8.63	0.85	0.01
	C	2.07	2.06	0.14	9.76	1.00	0.01
16	Ah	1.44	0.92	0.13	8.73	0.12	0.51
	B1	1.19	0.83	0.10	7.40	0.11	0.49
	B2	1.14	0.81	0.09	6.91	0.10	0.49
	B3	1.32	0.96	0.09	7.27	0.17	0.43
	Cw	1.72	1.30	0.11	7.58	0.13	0.33
	R	5.33	3.44	0.99	26.63	1.00	0.22

Tabla 19. Resultados de los balances geoquímicos de los perfiles estudiados

Perfil	Horizonte	SiO_2	TiO_2	Fe_2O_3	MnO_2	Bases	FeO
Chis	C1	-8.30	-48.42	-21.39	-2.42	16.93	
	C2	-2.57	-66.36	-18.23	-19.72	9.63	
	C3	-3.40	-27.99	-25.14	-33.90	6.04	
Tal		-30.60	0.17	-0.25	0.01	-0.57	0.12
Tall		-29.91	-0.03	-0.36	-0.00	-2.04	0.05
14	A	-51.17	21.24	374.20	-51.89	1218.41	
	Bw	-46.81	-11.12	388.40	-69.22	977.60	
	C	-38.94	-4.41	46.82	31.09	485.50	
15	Ah	-56.63	-31.05	-2.20	52.38	-264.08	
	AB	-57.10	-35.97	3.79	50.68	-253.59	
	B2	-58.96	-36.99	1.21	27.19	-275.44	
	Cw	-22.79	-8.08	2.10	39.39	18.00	
2	A	-1.02	60.75	300.91	1410.38	-72.26	
	AB	-6.73	36.53	186.59	-83.73	-66.07	
	B21	-10.03	23.47	97.43	-71.00	-55.84	
	B22	-3.28	21.38	74.41	-42.20	-37.51	
	C	-4.55	12.65	46.93	-18.43	-29.48	
3	A	-24.37	30.92	222.66	1302.75	-24.37	
	AB	-23.53	27.54	135.47	394.32	-23.53	
	B21	-23.79	13.57	73.53	626.48	-23.79	
	B22	-22.59	4.93	59.32	248.70	-22.59	
	BC	-11.96	2.21	11.30	37.59	-11.96	
	C	20.87	24.69	27.09	40.27	20.87	
Jal	A12	-7.31	-46.83	205.73	-32.06	-134.03	
	B12	-1.79	-75.46	238.68	-21.60	-73.06	
	B21	-8.25	-63.83	266.52	-10.46	-101.64	
	C	-3.32	-46.40	-22.95	-20.09	-60.01	
16	Ah	-72.18	-41.67	3.85	200.00	-336.72	
	B1	-77.71	-50.00	-22.69	83.33	-363.52	
	B2	-78.58	-58.33	-24.28	71.88	-368.80	
	B3	-75.45	-58.97	-31.48	38.46	-355.21	
	Cw	-68.23	-59.23	-41.78	22.32	-367.47	

Tabla 20. Cálculo de los elementos climáticos para la estación Tres Cruces

Concepto	Enero	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dic	anual	media
T (°C)	7,40	8,90	10,80	11,40	12,30	11,30	10,10	10,30	10,10	10,00	8,60	7,90		9,93
P (cm)	2,37	0,84	0,14	4,08	8,86	30,98	37,84	39,28	31,58	13,10	1,06	1,13	171,26	14,27
I	1,85	2,39	3,21	3,48	3,91	3,44	2,90	2,99	2,90	2,86	2,27	2,00	34,20	5,55
EP' (cm)	3,63	4,34	5,31	5,60	6,08	5,55	4,94	5,04	4,94	4,90	4,18	3,82	58,33	4,86
F	0,95	0,90	1,03	1,05	1,13	1,11	1,14	1,11	1,02	1,00	0,93	0,94	12,31	1,03
EP (cm)	3,45	3,91	5,47	5,88	6,87	6,16	5,63	5,59	5,04	4,90	3,89	3,59	60,38	5,03
MHS (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	1,99	8,01	0,00	0,00	0,00	0,00	-2,83	-7,17	0,03	0,00
HA (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	1,99	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	7,17	0,00	59,16	4,93
s (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,81	32,21	33,69	26,54	8,20	0,00	0,00	117,44	9,79
d (cm)	1,08	3,07	5,33	1,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,46	13,73	1,14
EPR (cm)	3,45	3,91	5,47	5,88	10,85	38,99	37,84	39,28	31,58	13,10	3,89	3,59	197,82	16,49
E (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,10	24,89	25,72	16,96	0,00	83,68	6,97
RP	-0,31	-0,76	-0,97	-0,31	0,29	4,03	5,72	6,02	5,27	1,67	-0,73	-0,69	19,21	1,60

Latitud 19°03'
Longitud 99°14'
Altitud 2810 msnm

Tabla 21. Cálculo de los elementos climáticos para la estación San José Acateno

Concepto	Enero	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dic	anual	media
T (°C)	19,60	22,00	23,80	24,00	26,00	26,00	27,00	27,00	21,00	20,00	19,00	18,00	275,40	22,95
P (cm)	7,50	7,50	11,50	5,00	22,00	20,14	51,50	61,00	48,00	61,00	48,00	9,00	352,14	29,35
I	7,91	9,42	10,61	10,75	12,13	13,56	12,65	12,85	8,78	8,16	7,55	6,95	121,55	19,60
EP' (cm)	5,04	6,15	10,11	10,35	12,69	15,60	14,30	14,30	7,17	6,28	5,45	4,70	115,44	9,62
F	0,95	0,90	1,03	1,05	1,13	1,11	1,14	1,11	1,02	1,00	0,93	0,94	12,31	1,03
EP (cm)	5,64	7,34	10,42	10,87	14,57	17,54	16,30	15,87	7,32	6,28	5,07	4,42	121,61	10,13
MHS (cm)	1,86	0,16	1,08	0,00	6,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10	0,83
HA (cm)	1,86	2,02	3,11	3,11	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	90,10	7,51
s (cm)	0,00	0,00	0,00	5,87	0,54	2,60	35,20	45,13	40,68	54,72	42,93	0,00	227,68	18,97
d (cm)	0,00	0,00	0,00	5,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,87	0,49
EPR (cm)	5,64	7,34	10,42	5,00	14,57	17,54	16,30	15,87	7,32	6,28	5,07	4,42	115,75	9,65
E (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	2,93	1,74	2,17	18,69	31,91	36,29	45,51	44,22	183,46	15,29
RP	0,33	0,02	0,10	-0,54	0,51	0,15	2,16	2,84	5,56	8,72	8,47	1,04	29,36	2,45

Latitud 20°15'
Longitud 97°25'

Tabla 22. Cálculo de los elementos climáticos para la estación Las Minas

Concepto	Enero	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dic	anual	media
T (°C)	16,00	17,50	19,50	22,90	24,60	25,10	23,80	24,20	23,70	21,70	19,20	16,90		21,26
P (cm)	10,35	8,74	13,33	13,38	18,45	52,33	69,48	48,66	67,31	41,23	24,67	12,98	380,91	31,74
I	5,62	6,66	7,85	10,01	11,16	11,50	10,61	10,69	10,55	9,23	7,67	6,32	108,27	17,56
EP' (cm)	4,06	5,03	6,51	9,56	11,34	11,90	10,48	10,90	10,37	8,41	6,28	4,63	99,46	8,29
F	0,95	0,90	1,03	1,05	1,13	1,11	1,14	1,11	1,02	1,00	0,93	0,94	12,31	1,03
EP (cm)	3,86	4,53	6,71	10,04	12,81	13,20	11,95	12,10	10,58	8,41	5,84	4,35	104,37	8,70
MHS (cm)	6,49	3,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	0,83
HA (cm)	6,49	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	3,51	110,00	9,17
s (cm)	-0,00	0,70	6,62	3,34	5,64	39,13	57,53	36,56	56,73	32,82	18,83	8,63	266,54	22,21
d (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
EPR (cm)	3,86	4,53	6,71	10,04	12,81	13,20	11,95	12,10	10,58	8,41	5,84	4,35	104,37	8,70
E (cm)	0,00	-0,00	0,35	3,49	0,00	2,82	20,97	39,25	37,91	47,32	40,07	29,45	221,63	18,47
RP	1,68	0,93	0,99	0,33	0,44	2,96	4,82	3,02	5,36	3,91	3,23	1,98		

Latitud 19°58'
Longitud 97°23'
Altitud 537 m

Tabla 23. Cálculo de los elementos climáticos para la estación Tala

Concepto	Enero	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dic	anual	media
T (°C)	15,50	18,10	19,20	20,90	23,10	23,50	22,50	22,50	21,90	21,10	19,20	16,50		20,33
P (cm)	0,98	0,00	0,08	0,40	1,41	13,70	21,39	19,39	11,90	2,14	1,42	4,75	77,56	6,46
I	5,55	7,01	7,67	8,72	10,15	10,41	10,41	9,75	9,36	8,85	7,67	6,10	101,65	16,48
EP' (cm)	4,18	5,86	6,67	8,03	10,00	10,38	9,44	9,44	8,90	8,20	6,67	4,79	92,56	7,71
F	0,97	0,90	1,03	1,05	1,14	1,13	1,15	1,11	1,02	1,00	0,93	0,96	12,39	1,03
EP (cm)	4,05	5,27	6,87	8,43	11,40	11,73	10,86	10,48	9,08	8,20	6,20	4,60	97,17	8,10
MHS (cm)	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	1,98	8,02	0,00	0,00	-6,06	-3,94	0,16	0,32	0,03
HA (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,98	10,00	10,00	10,00	3,94	0,00	0,16	36,08	3,01
s (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	2,51	8,91	2,82	0,00	0,00	0,00	14,24	1,19
d (cm)	2,91	5,27	6,79	8,03	9,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,84	0,00	33,84	2,82
EPR (cm)	0,98	0,00	0,08	0,40	1,41	11,73	10,86	10,48	9,08	2,14	1,42	4,59	53,16	4,43
E (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,46	3,64	1,82	0,00	0,00	9,91	0,83
RP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,46	3,64	1,82	0,00	0,00	9,91	0,83

Latitud 20°39'
Longitud 103°30'

Tabla24. Cálculo de los elementos climáticos para la estación Jalapa

Concepto	Enero	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dic	anual	media
T (°C)	14,90	15,80	17,90	19,80	20,40	19,90	19,30	19,50	19,10	18,00	16,40	15,40		18,03
P (cm)	4,69	4,67	5,31	6,11	11,37	27,34	20,96	18,56	26,57	12,98	6,41	4,45	149,32	12,44
I	5,22	5,71	6,90	8,03	8,41	8,10	7,73	7,85	7,61	6,95	6,04	5,49	84,03	13,57
EP' (cm)	4,63	5,16	6,51	7,84	8,29	7,92	7,48	7,62	7,34	6,57	5,53	4,92	79,81	6,65
F	0,95	0,90	1,03	1,05	1,13	1,11	1,14	1,11	1,02	1,00	0,93	0,94	12,31	1,03
EP (cm)	4,40	4,64	6,70	8,24	9,37	8,79	8,53	8,46	7,48	6,57	5,14	4,63	82,95	6,91
MHS (cm)	0,29	0,00	0,00	0,00	2,00	7,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	0,83
HA (cm)	0,29	0,29	0,29	0,29	2,29	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	73,48	6,12
s (cm)	0,00	0,07	1,39	2,13	0,00	10,84	12,43	10,10	19,09	6,41	1,27	0,00	63,72	5,31
d (cm)	0,00	0,00	1,39	2,13	-4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,49	-0,04
EPR (cm)	4,40	4,64	5,31	6,11	13,37	8,79	8,53	8,46	7,48	6,57	5,14	4,63	83,44	6,95
E (cm)	0,00	0,00	0,04	0,71	1,42	0,71	5,76	9,10	9,60	14,34	10,38	5,82	57,90	4,83
RP	0,07	-0,02	-0,21	-0,26	0,21	2,11	1,46	1,19	2,55	0,97	0,25	-0,04	8,29	0,69

Estación Jalapa, Ver.
Latitud 19°32'
Longitud 96°55'

Tabla 25. Cálculo de los elementos climáticos para la estación Chapultenango, Chis.

Concepto	Enero	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dic	anual	media
T (°C)	19,30	20,30	22,10	23,90	24,70	24,70	24,20	24,10	23,80	22,50	21,10	19,90		22,55
P (cm)	28,98	22,38	20,48	18,08	23,05	39,80	42,51	42,65	58,25	60,45	36,59	31,04	424,26	35,36
I	7,73	8,34	9,49	10,68	11,23	11,23	10,89	10,82	10,61	9,75	8,85	8,10	117,70	18,97
EP' (cm)	5,89	6,73	8,41	10,34	11,28	11,28	10,69	10,57	10,23	8,82	7,45	6,38	108,06	9,01
F	0,95	0,90	1,03	1,05	1,13	1,11	1,14	1,11	1,02	1,00	0,93	0,94	12,31	1,03
EP (cm)	5,59	6,05	8,67	10,86	12,74	12,52	12,18	11,73	10,43	8,82	6,93	6,00	112,53	9,38
MHS (cm)	23,39	0,00	0,00	0,00	10,31	7,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	41,40	3,45
HA (cm)	23,39	23,39	23,39	23,39	33,69	41,40	41,40	41,40	41,40	41,40	10,00	10,00	354,25	29,52
s (cm)	0,00	16,33	11,81	7,22	0,00	19,57	30,33	30,92	47,82	51,63	29,66	0,00	245,29	20,44
d (cm)	0,00	0,00	-11,81	-7,22	-20,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-39,65	-3,30
EPR (cm)	5,59	6,05	20,48	18,08	33,36	12,52	12,18	11,73	10,43	8,82	6,93	6,00	152,18	12,68
E (cm)	0,00	0,00	8,16	9,99	8,61	4,30	11,94	21,13	26,02	36,92	44,28	36,97	208,32	17,36
RP	4,18	2,70	1,36	0,67	0,81	2,18	2,49	2,63	4,58	5,85	4,28	4,17	35,91	2,99

Latitud 17°21'35"
Longitud 93°13'45"
Altitud 700 m

Tabla26. Cálculo de los elementos climáticos para la estación Zautla

Concepto	Enero	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dic	anual	media
T (°C)	12,90	13,90	16,20	18,00	18,60	18,00	16,80	16,90	17,10	15,70	14,40	13,00		15,96
P (cm)	4,00	3,50	3,00	3,00	5,00	11,00	7,50	7,60	13,00	6,00	3,50	2,00	69,10	5,76
i	4,20	4,70	5,93	6,95	7,31	6,95	6,26	6,32	6,43	5,65	4,96	4,25	69,93	11,30
EP' (cm)	4,26	4,80	6,14	7,26	7,65	7,26	6,50	6,56	6,69	5,83	5,08	4,31	72,36	6,03
F	0,95	0,90	1,03	1,05	1,13	1,11	1,14	1,11	1,02	1,00	0,93	0,94	12,31	1,03
EP (cm)	4,05	4,32	6,32	7,62	8,65	8,06	7,41	7,29	6,82	5,83	4,73	4,06	75,16	6,26
MHS (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,94	0,09	0,31	6,18	0,00	0,00	0,00	9,52	0,79
HA (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,94	3,03	3,34	9,52	9,52	9,52	9,52	47,37	3,95
s (cm)	0,05	0,82	3,32	4,62	3,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	1,23	0,00	13,85	1,15
d (cm)	0,05	0,82	3,32	4,62	3,65	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,17	1,23	2,06	15,58	1,30
EPR (cm)	4,00	3,50	3,00	3,00	5,00	8,06	7,41	7,29	6,82	6,00	3,50	2,00	59,58	4,97
E (cm)	0,00	0,02	0,42	1,87	3,25	3,45	1,72	0,86	0,43	0,22	0,19	0,71	13,14	1,10
RP	-0,01	-0,19	-0,53	-0,61	-0,42	0,36	0,01	0,04	0,91	0,03	-0,26	-0,51	-1,17	-0,10

Estación Zautla, Pue
Latitud 19°44"
Longitud 97°40"
Altitud 2500 m

Tabla 27. Cálculo de los elementos climáticos para la estación Teziutlán

Concepto	Enero	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dic	anual	media
T (°C)	12,80	13,90	17,00	19,00	18,30	19,00	16,50	17,50	15,90	15,50	13,50	13,00	191,90	15,99
P (cm)	5,00	4,00	4,50	5,00	6,00	20,50	18,50	17,50	35,00	25,00	10,50	6,00	157,50	13,13
I	4,15	4,70	6,38	7,55	7,13	7,55	6,10	6,66	5,76	5,55	4,50	4,25	70,27	11,37
EP' (cm)	4,19	4,78	6,61	7,90	7,44	7,90	6,30	6,92	5,94	5,70	4,56	4,30	72,55	6,05
F	0,95	0,90	1,03	1,05	1,13	1,11	1,14	1,11	1,02	1,00	0,93	0,94	12,31	1,03
EP (cm)	3,98	4,31	6,81	8,30	8,41	8,77	7,18	7,69	6,06	5,70	4,25	4,04	75,47	6,29
MHS (cm)	1,02	0,00	0,00	0,00	0,00	7,71	1,27	0,00	0,00	0,00	-6,25	3,75	7,49	0,62
HA (cm)	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	8,73	10,00	10,00	10,00	10,00	3,75	0,00	57,57	4,80
s (cm)	0,00	0,31	2,31	3,30	2,41	4,02	10,05	9,81	28,94	19,30	12,51	0,00	92,95	7,75
d (cm)	-2,04	0,31	2,31	3,30	2,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,28	0,52
EPR (cm)	6,02	4,00	4,50	5,00	6,00	8,77	7,18	7,69	6,06	5,70	4,25	4,04	69,20	5,77
E (cm)	0,00	0,00	0,15	1,23	2,26	2,34	3,18	6,61	8,21	18,58	18,94	15,72	77,23	6,44
RP	0,26	-0,07	-0,34	-0,40	-0,29	1,34	1,58	1,26	4,76	3,39	1,47	0,49	13,48	1,12

Latitud 19°47"
Longitud 97°21"
Altitud 2100 m

ANEXO II

Fig. 1. Porcentaje grava, arena, limo y arcilla, Perfil Chis

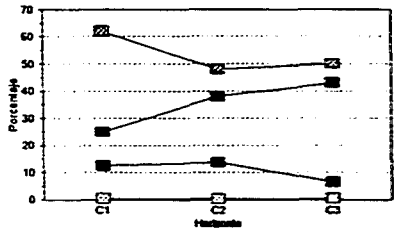


Fig. 2 Porcentaje grava, arena, limo y arcilla, Perfil Tal1

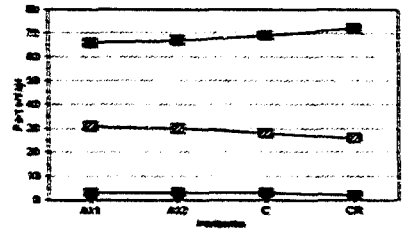


Fig. 3 Porcentaje grava, arena, limo y arcilla, Perfil Tal

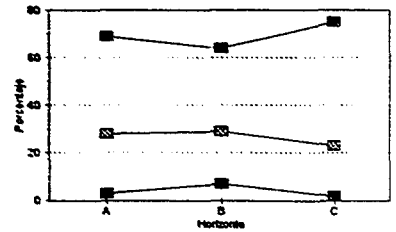


Fig. 4 Porcentaje grava, arena, limo y arcilla, Perfil 63

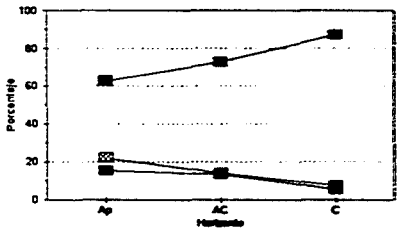


Fig. 5 Porcentaje grava, arena, limo arcilla, Perfil 14

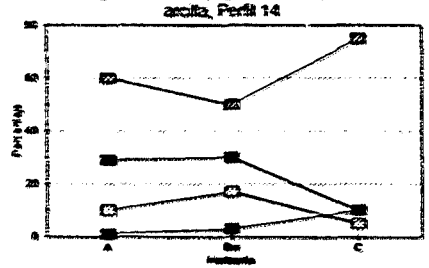


Fig. 6 Porcentaje grava, arena, limo y arcilla, Perfil 6

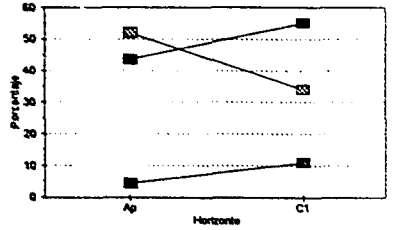


Fig. 7. Porcentaje grava, arena, limo y arcilla, Perfil Si3

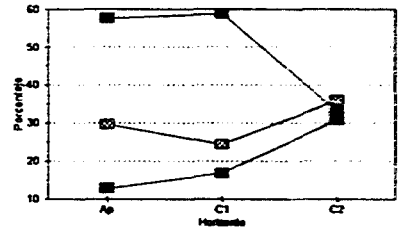


Fig. 8 Porcentaje grava, arena, limo y arcilla, Perfil 110

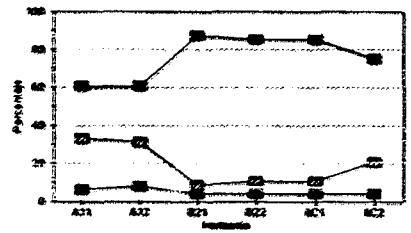


Fig. 9 Porcentaje grava, arena, limo y arcilla, Perfil Si1

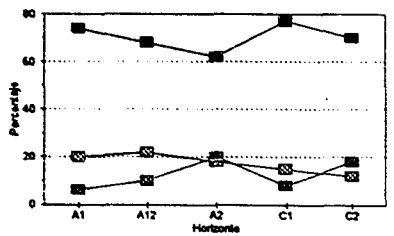


Fig. 10.Porcentaje grava, arena, limo y arcilla, Perfil Si2

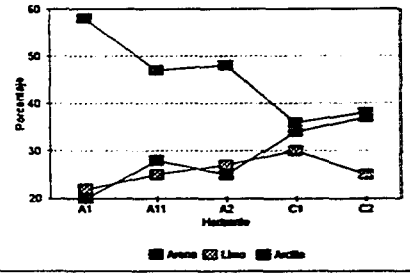


Fig. 11. Porcentaje grava, arena, limo y arcilla, Perfil 15

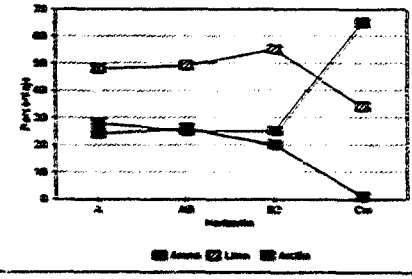


Fig 12 Porcentaje grava, arena, limo y arcilla, Perfil 2

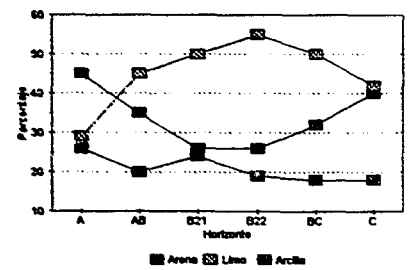


Fig. 13. Porcentaje grava, arena, limo y arcilla. Perfil 3

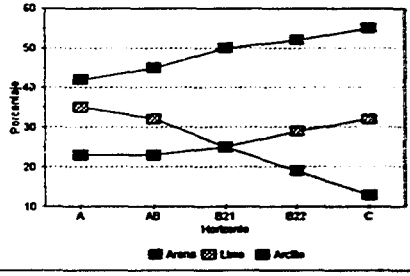


Fig. 14 Porcentaje grava, arena, limo y arcilla, Perfil Jal

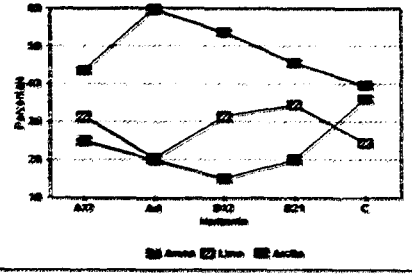
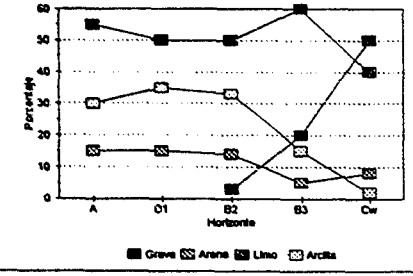


Fig. 15 Porcentaje grava, arena, limo y arcilla, Perfil 16



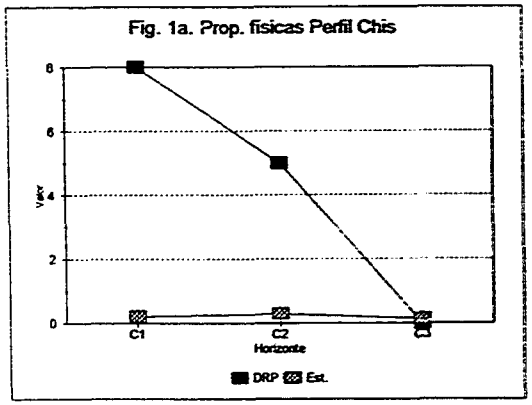


Fig. 1a. Prop. físicas Perfil Chis
Valor
Horizonte
C1
C2
C3
DRP
Est.

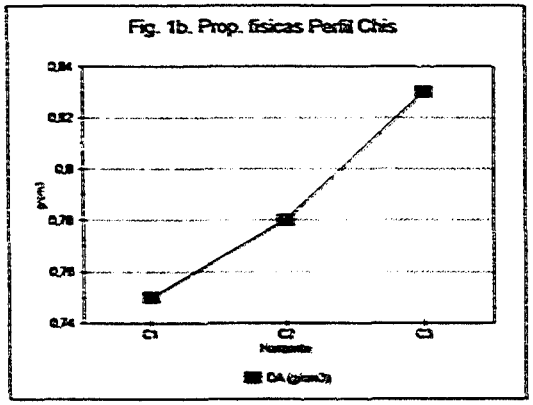


Fig. 1b. Prop. físicas Perfil Chis
C1
C2
C3

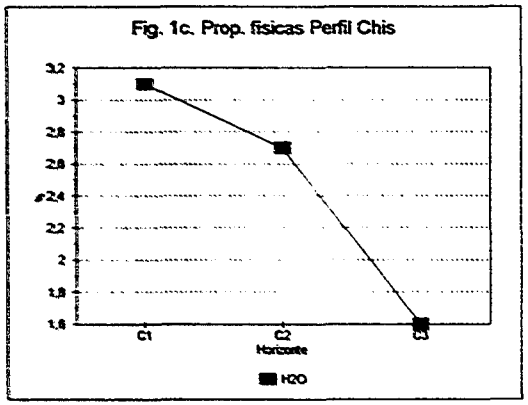


Fig. 1c. Prop. físicas Perfil Chis
C1
C2
C3
H2O

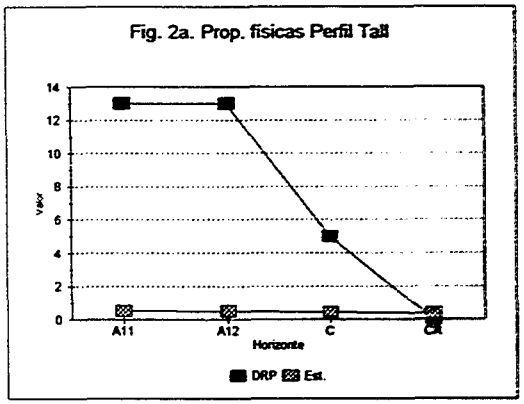


Fig. 2a. Prop. físicas Perfil Tall
Valor
Horizonte
A11
A12
C
CR
DRP
Est.

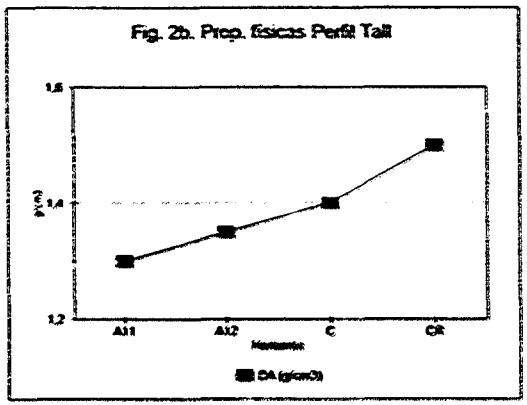


Fig. 2b. Prop. físicas Perfil Tall
A11
A12
C
CR

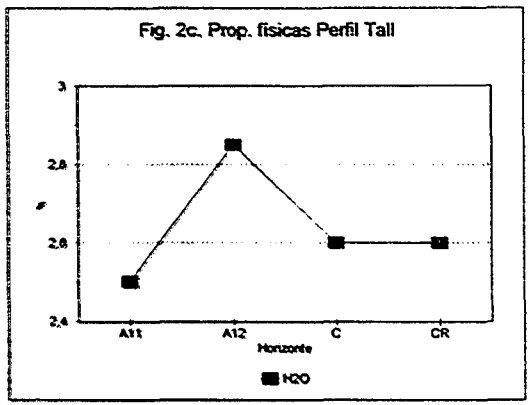


Fig. 2c. Prop. físicas Perfil Tall
A11
A12
C
CR
H2O

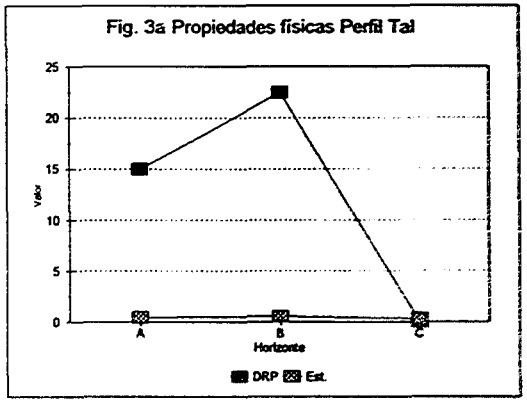


Fig. 3a Propiedades físicas Perfil Tal
Valor
Horizonte
A
B
C
DRP
Est.

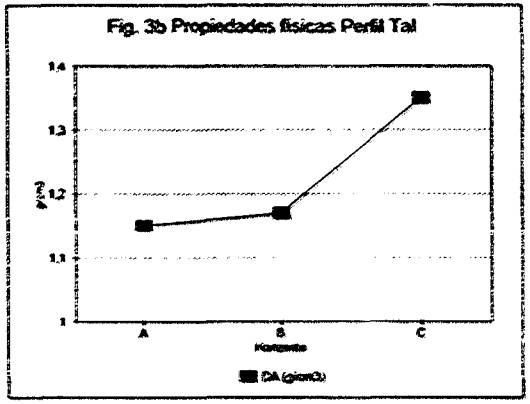


Fig. 3b Propiedades físicas Perfil Tal
A
B
C

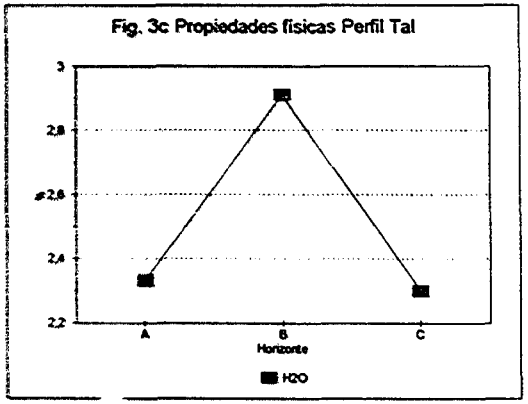


Fig. 3c Propiedades físicas Perfil Tal
A
B
C
H2O

Anexo II

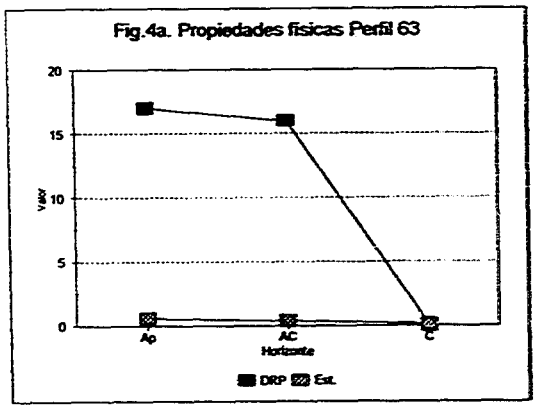


Fig.4a. Propiedades físicas Perfil 63
20
15
10
5
0
Valor
Ap
AC
C
Horizonte
DRP
Est.

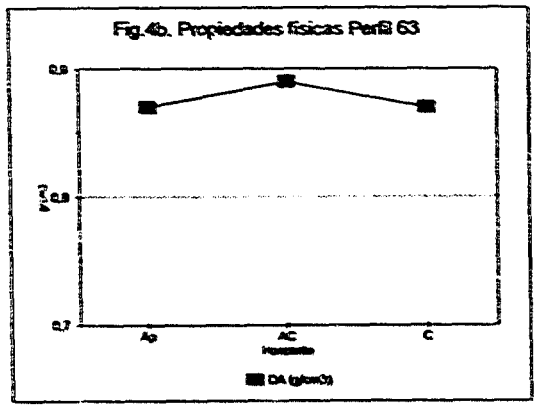


Fig.4b. Propiedades físicas Perfil 63
Ap
AC
C
Horizonte
DA (g/cm3)

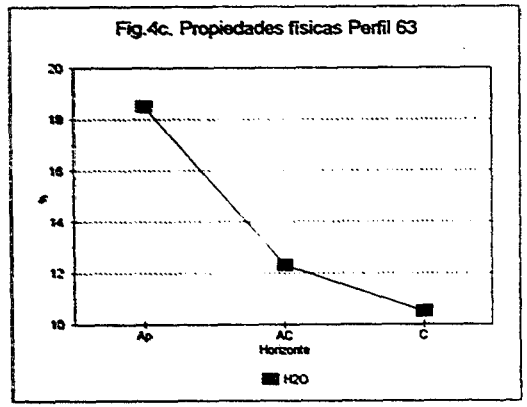


Fig.4c. Propiedades físicas Perfil 63
20
18
16
14
12
10
Ap
AC
C
Horizonte
H2O

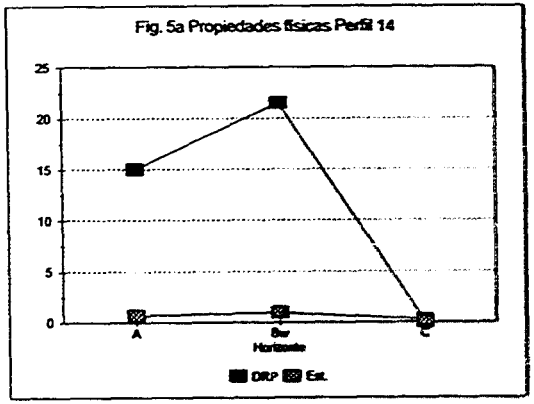


Fig. 5a Propiedades físicas Perfil 14
25
20
15
10
5
0
A
Bw
C
Horizonte
DRP
Est.

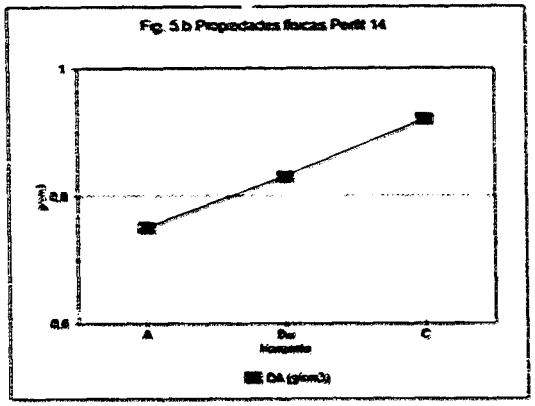


Fig. 5.b Propiedades físicas Perfil 14
1
A
Bw
C
Horizonte
DA (g/cm3)

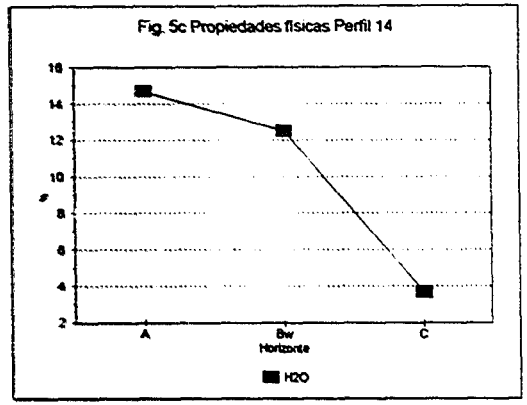


Fig. 5c Propiedades físicas Perfil 14
16
14
12
10
8
6
4
2
A
Bw
C
Horizonte
H2O

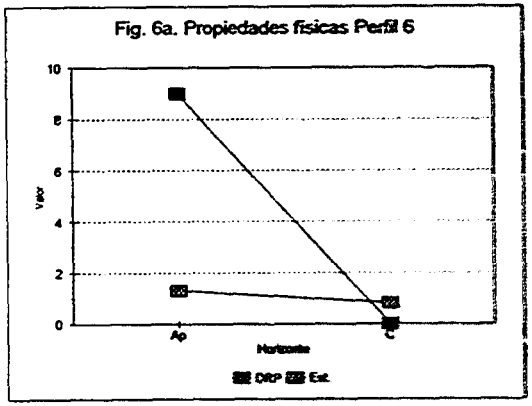


Fig. 6a. Propiedades físicas Perfil 6
10
8
6
4
2
0
Valor
Ap
C
Horizonte
DRP
Est.

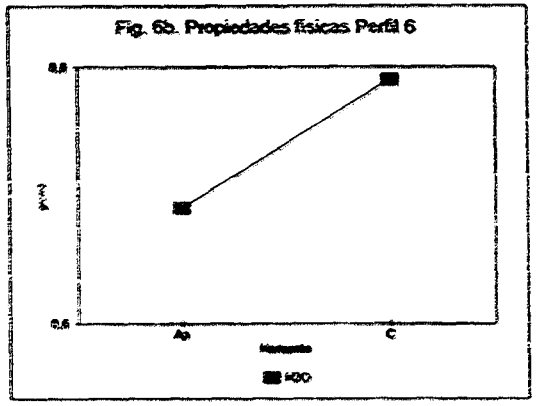


Fig. 6b. Propiedades físicas Perfil 6
Ap
C
H2O

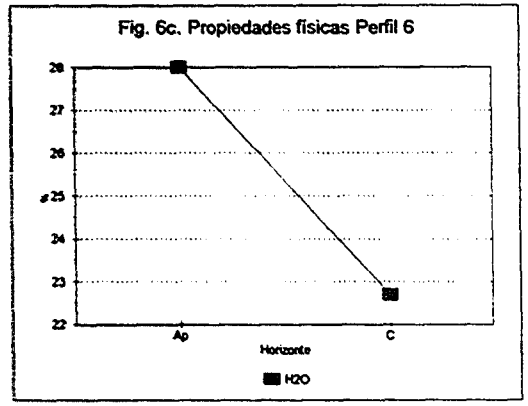


Fig. 6c. Propiedades físicas Perfil 6
28
27
26
25
24
23
22
Ap
C
Horizonte
H2O

Anexo II

Fig. 7a Propiedades físicas Perfil Si3

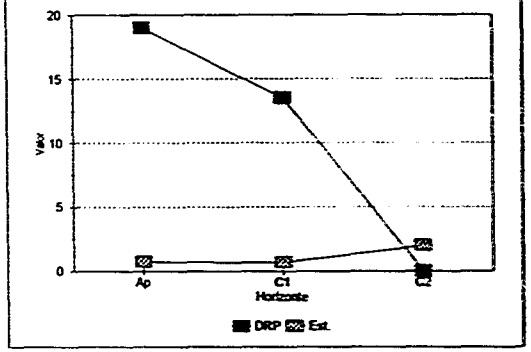


Fig. 7b Propiedades físicas Perfil Si3

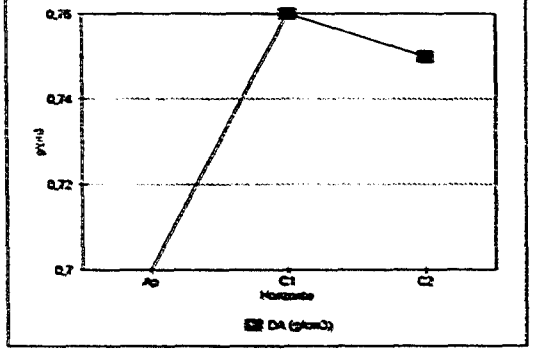


Fig. 7c Propiedades físicas Perfil Si3

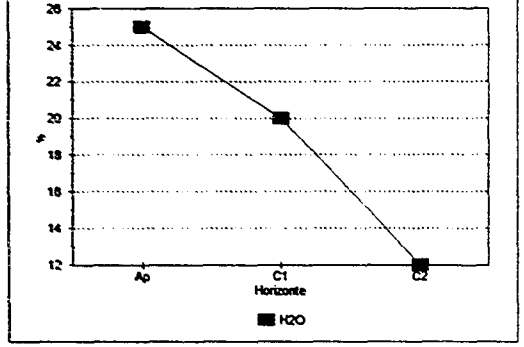


Fig. 8a Propiedades físicas Perfil 110

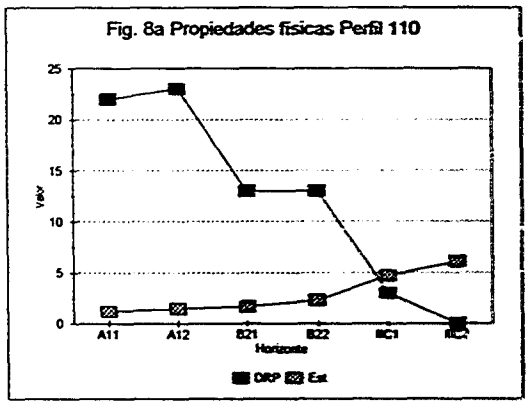


Fig. 8a Propiedades físicas Perfil 110

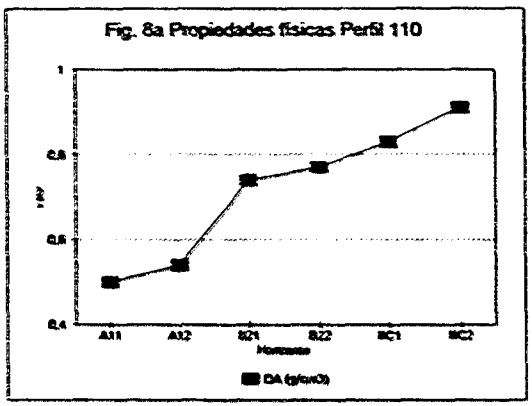


Fig. 8a Propiedades físicas Perfil 110

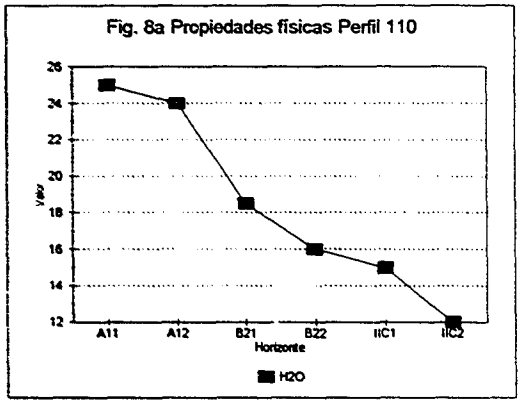


Fig. 9a Propiedades físicas Perfil Si1

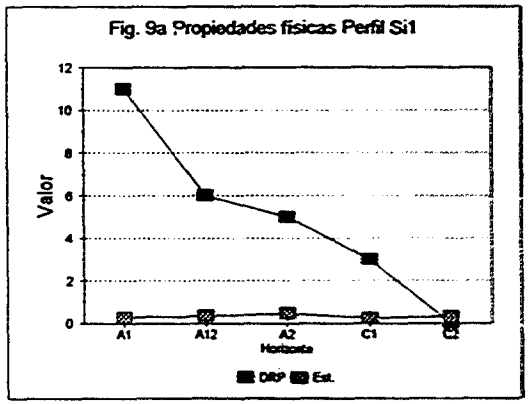


Fig. 9b Propiedades físicas Perfil Si1

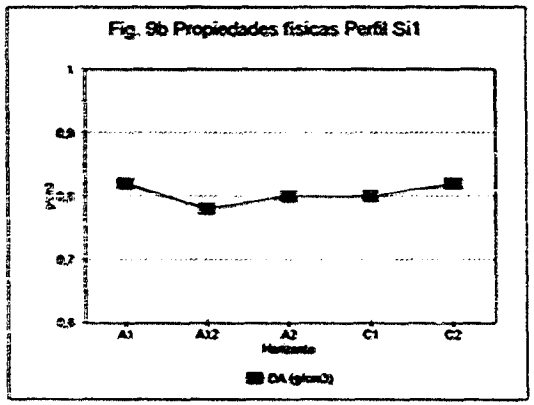
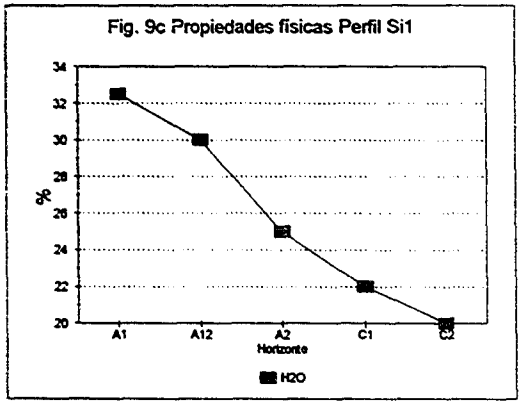


Fig. 9c Propiedades físicas Perfil Si1



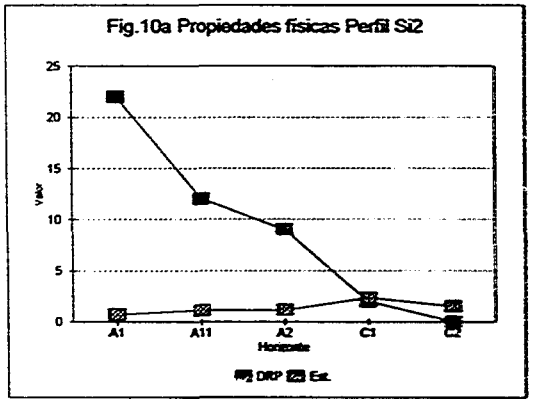


Fig.10a Propiedades físicas Perfil Si2
25
20
15
10
5
0
Valor
A1
A11
A2
C1
C2
Horizonte
DRP
Est.

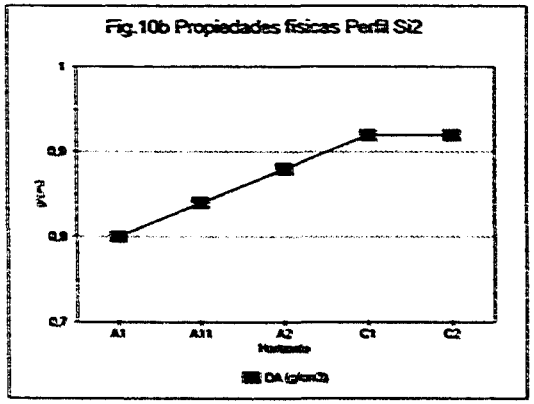


Fig.10b Propiedades físicas Perfil Si2
1
0,9
0,8
0,7
A1
A11
A2
C1
C2
DA (g/cm3)

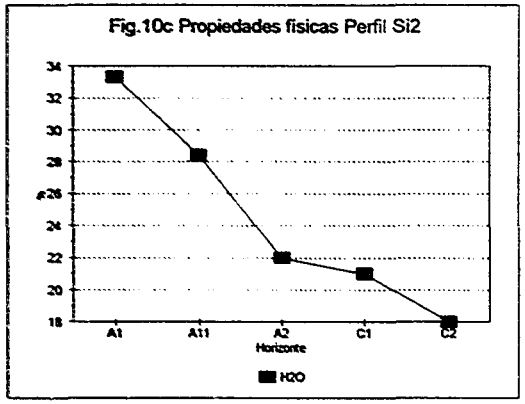


Fig.10c Propiedades físicas Perfil Si2
34
32
30
28
26
24
22
20
18
A1
A11
A2
C1
C2
Horizonte
H2O

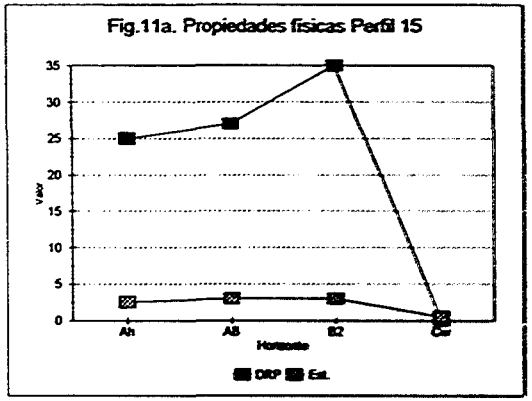


Fig.11a. Propiedades físicas Perfil 15
35
30
25
20
15
10
5
0
Valor
Ah
AB
B2
Cw
Horizonte
DRP
Est.

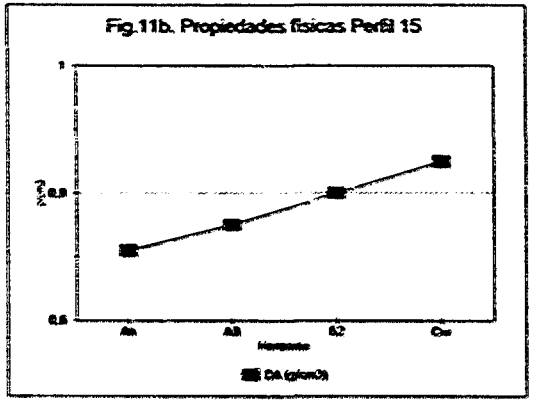


Fig.11b. Propiedades físicas Perfil 15
1
0,9
0,8
Ah
AB
B2
Cw
DA (g/cm3)

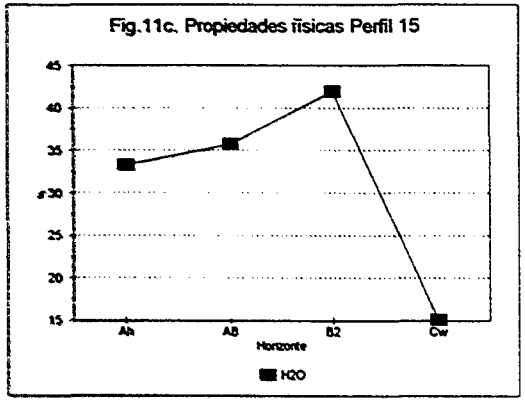
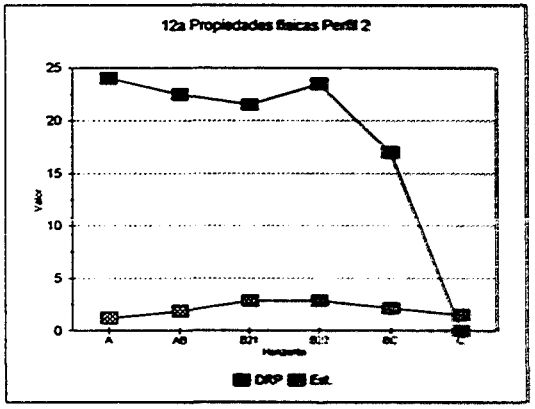
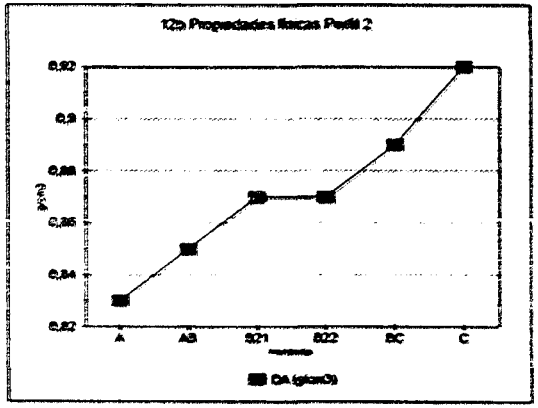
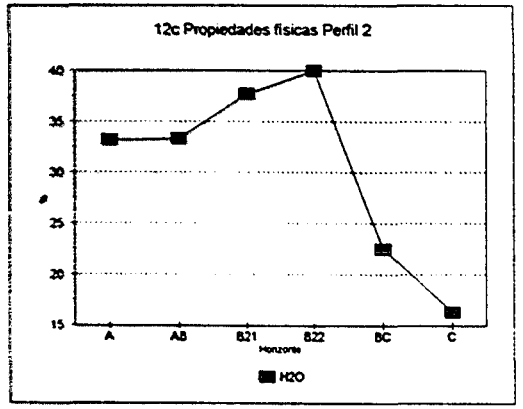


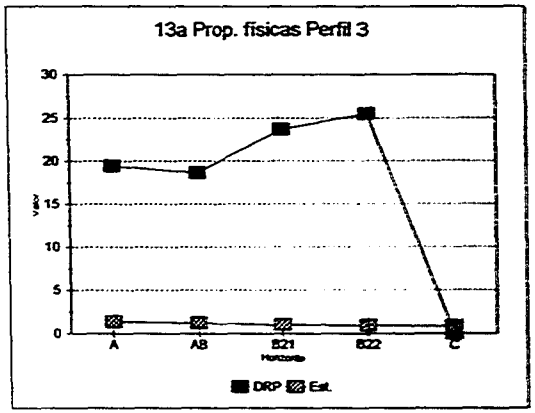
Fig.11c. Propiedades físicas Perfil 15
45
40
35
30
25
20
15
Ah
AB
B2
Cw
Horizonte
H2O

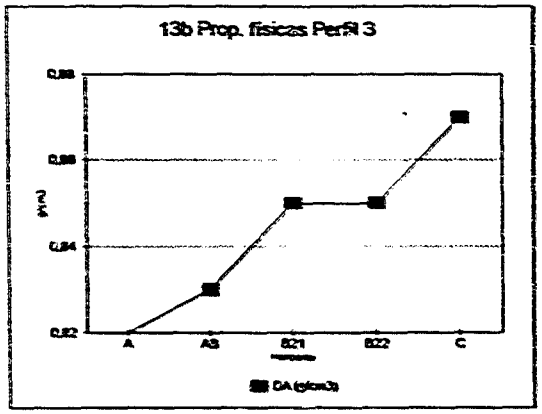

12a Propiedades físicas Perfil 2
25
20
15
10
5
0
Valor
A
AB
B21
B22
BC
C
DRP
Est.

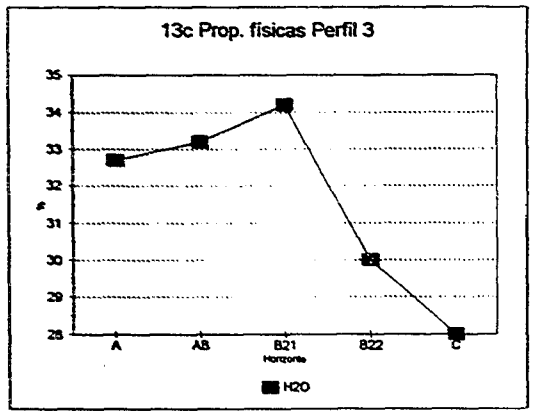

12b Propiedades físicas Perfil 2
0,92
0,9
0,88
0,86
0,84
0,82
A
AB
B21
B22
BC
C
DA (g/cm3)


12c Propiedades físicas Perfil 2
40
35
30
25
20
15
A
AB
B21
B22
BC
C
Horizonte
H2O

Anexo II


13a Prop. físicas Perfil 3
30
25
20
15
10
5
0
A
AB
B21
B22
C
DRP
Est.


13b Prop. físicas Perfil 3
A
AB
B21
B22
C
DA (g/cm3)


13c Prop. físicas Perfil 3
35
34
33
32
31
30
29
28
A
AB
B21
B22
C
H2O

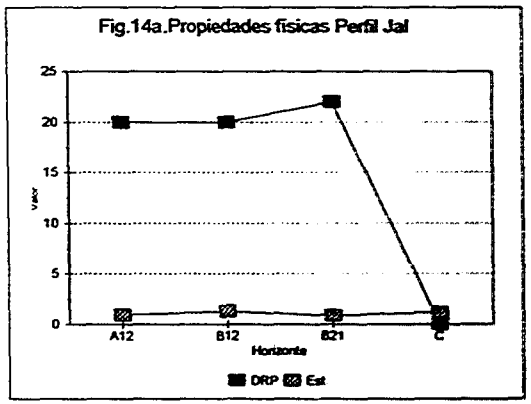


Fig.14a.Propiedades físicas Perfil Jal
25
20
15
10
5
0
A12
B12
B21
C
Horizonte
DRP
Est

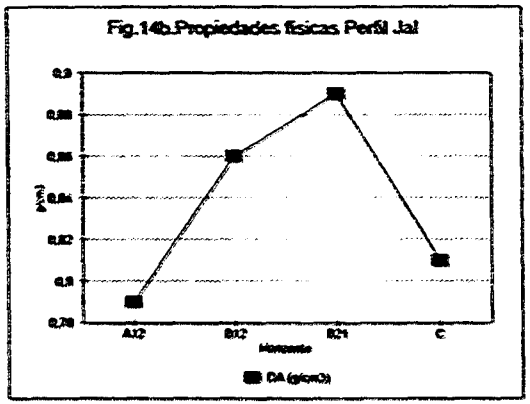


Fig.14b.Propiedades físicas Perfil Jal
A12
B12
B21
C
DA (g/cm3)

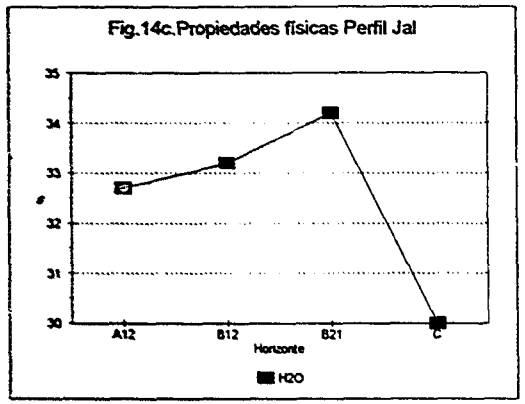


Fig.14c.Propiedades físicas Perfil Jal
35
34
33
32
31
30
A12
B12
B21
C
Horizonte
H2O

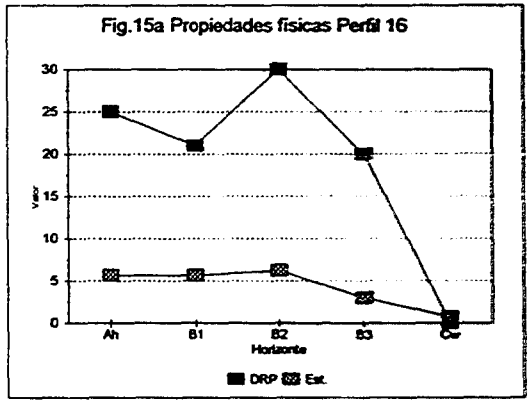


Fig.15a Propiedades físicas Perfil 16
30
25
20
15
10
5
0
Ah
B1
B2
B3
Cw
Horizonte
DRP
Est.

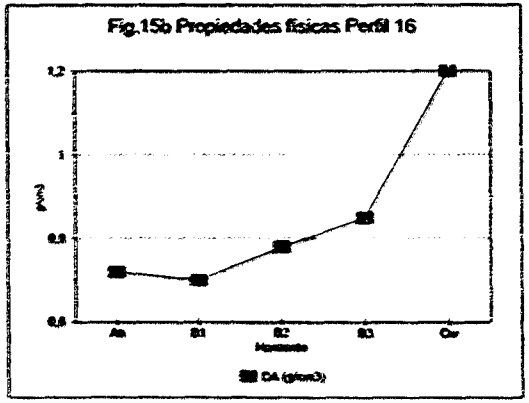


Fig.15b Propiedades físicas Perfil 16
1,2
1
Ah
B1
B2
B3
Cw
DA (g/cm3)

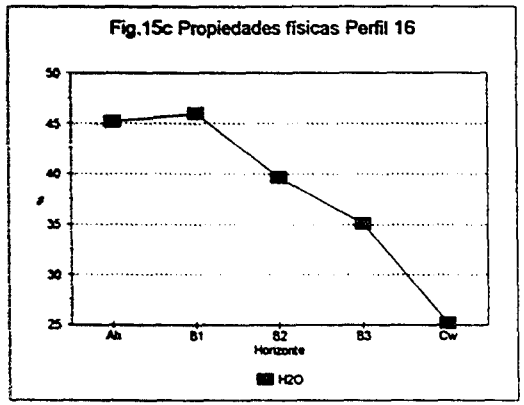


Fig.15c Propiedades físicas Perfil 16
50
45
40
35
30
25
Ah
B1
B2
B3
Cw
Horizonte
H2O

Anexo II

ANEXO III

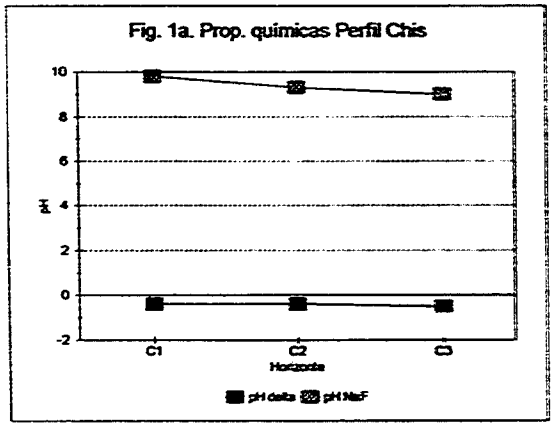


Fig. 1a. Prop. químicas Perfil Chis
pH
Horizonte
C1
C2
C3
pH dela
pH NaF

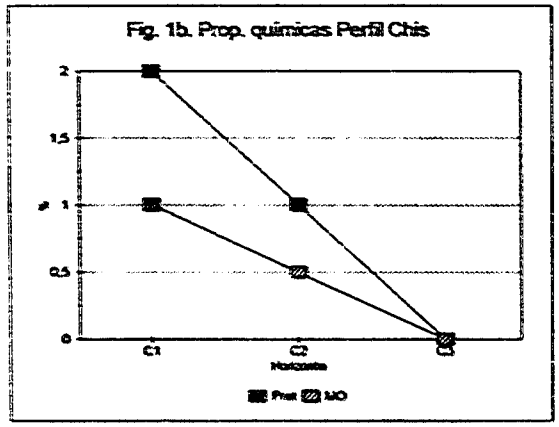


Fig. 1b. Prop. químicas Perfil Chis
%
Horizonte
C1
C2
C3
Prot
MO

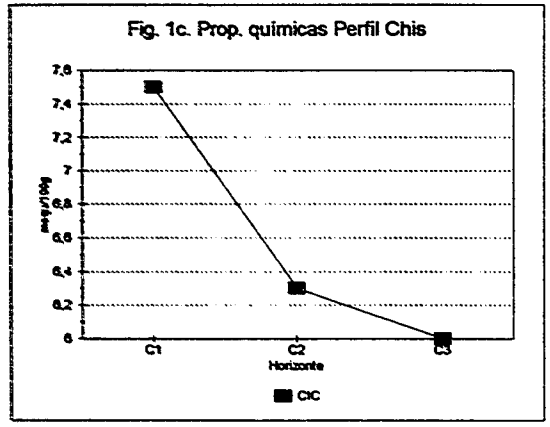


Fig. 1c. Prop. químicas Perfil Chis
meq/100g
Horizonte
C1
C2
C3
CIC

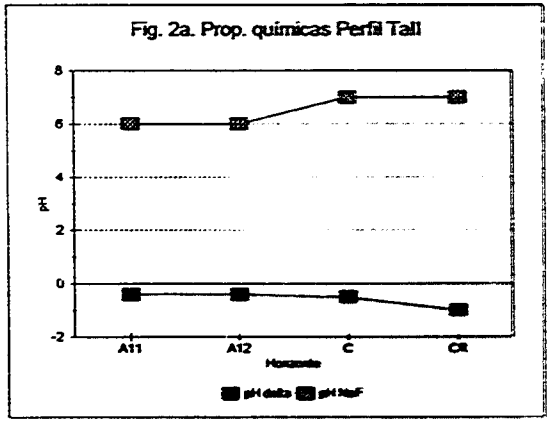


Fig. 2a. Prop. químicas Perfil Tall
pH
Horizonte
A11
A12
C
CR
pH dela
pH NaF

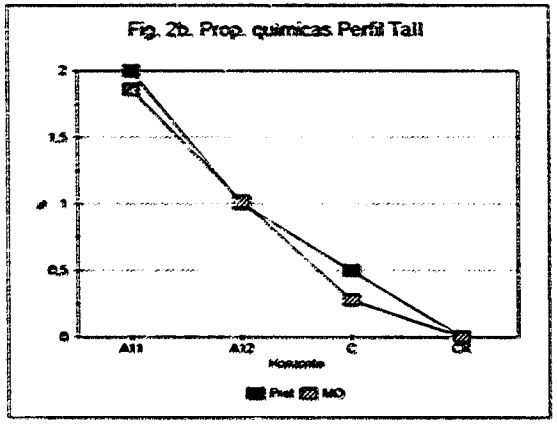


Fig. 2b. Prop. químicas Perfil Tall
%
Horizonte
A11
A12
C
CR
Prot
MO

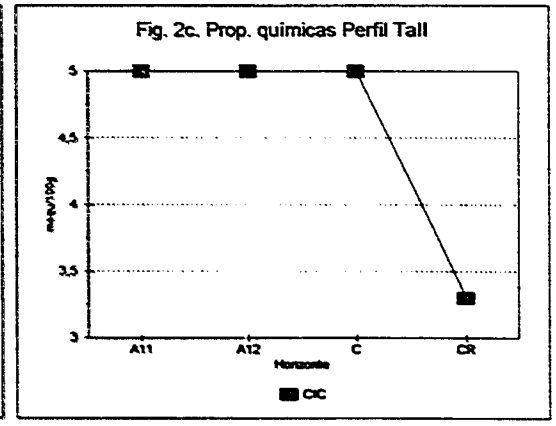


Fig. 2c. Prop. químicas Perfil Tall
meq/100g
Horizonte
A11
A12
C
CR
CIC

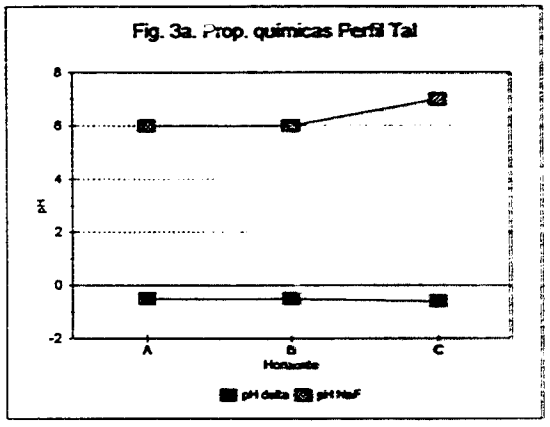


Fig. 3a. Prop. químicas Perfil Tal
pH
Horizonte
A
B
C
pH dela
pH NaF

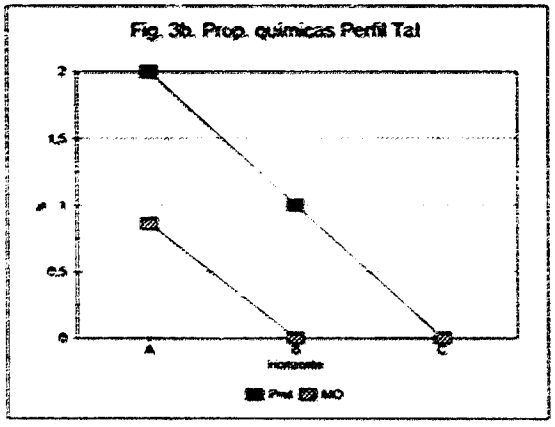


Fig. 3b. Prop. químicas Perfil Tal
%
Horizonte
A
B
C
Prot
MO

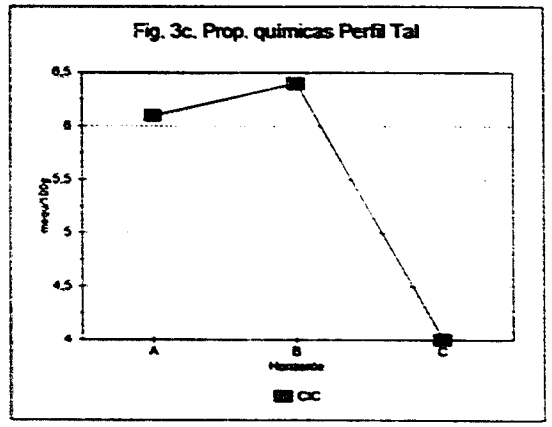


Fig. 3c. Prop. químicas Perfil Tal
meq/100g
Horizonte
A
B
C
CIC

Anexo III

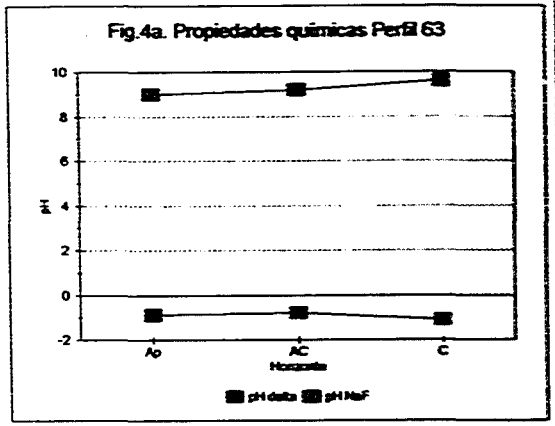


Fig.4a. Propiedades químicas Perfil 63
pH
Ap
AC
C
Horizonte
pH dalta
pH NaF

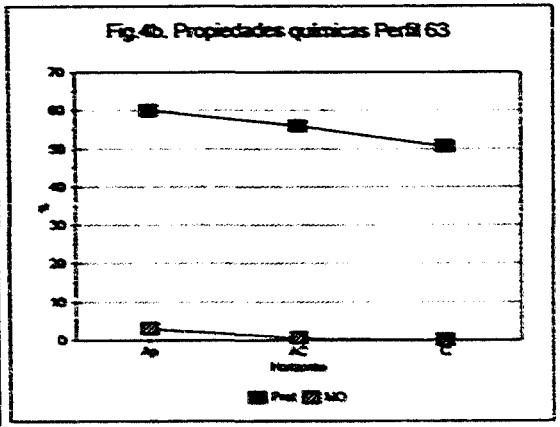


Fig.4b. Propiedades químicas Perfil 63
%
Ap
AC
C
Horizonte
Prot
MO

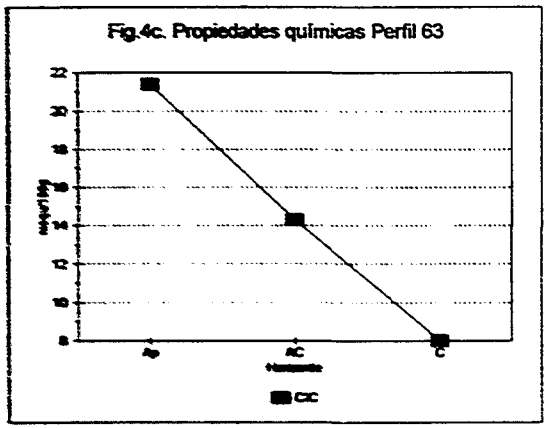


Fig.4c. Propiedades químicas Perfil 63
meq/100gr
Ap
AC
C
Horizonte
CIC

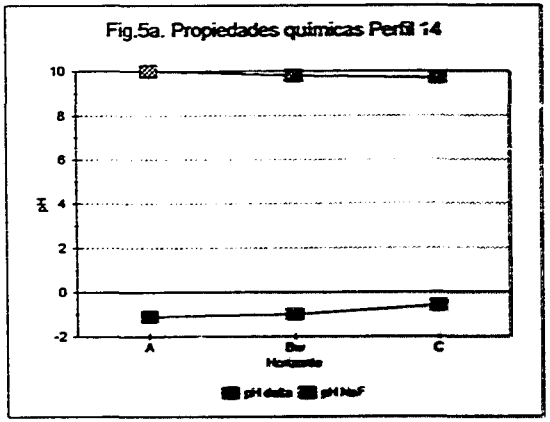


Fig.5a. Propiedades químicas Perfil 14
pH
A
Bw
C
Horizonte
pH dalta
pH NaF

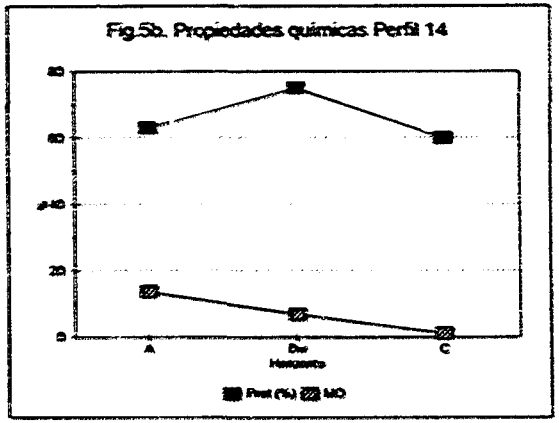


Fig.5b. Propiedades químicas Perfil 14
A
Bw
C
Horizonte
Prot (%)
MO

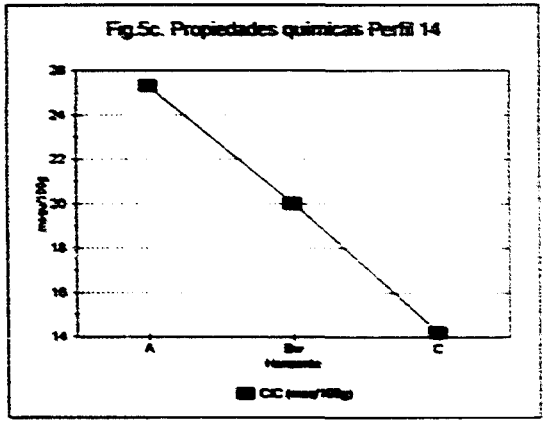


Fig.5c. Propiedades químicas Perfil 14
meq/100g
A
Bw
C
Horizonte
CIC

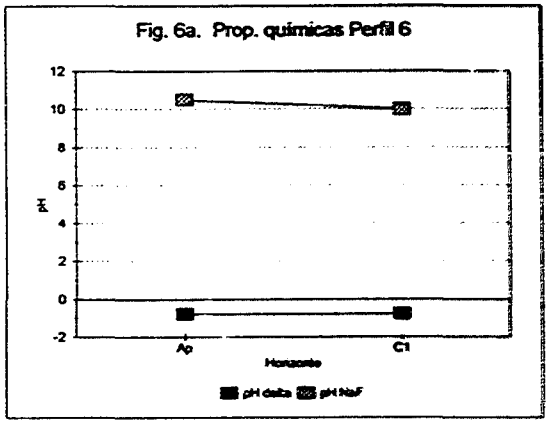


Fig. 6a. Prop. químicas Perfil 6
pH
Ap
C1
Horizonte
pH dalta
pH NaF

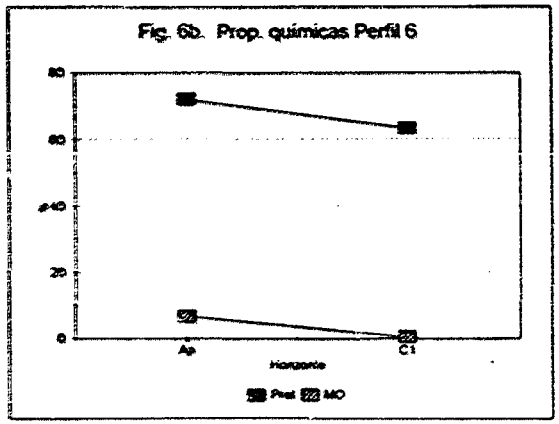


Fig. 6b. Prop. químicas Perfil 6
Ap
C1
Horizonte
Prot
MO

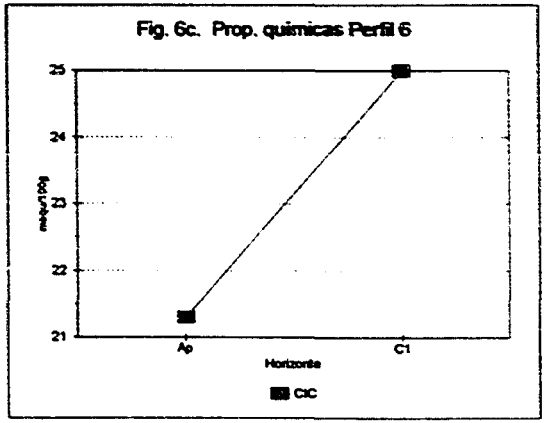


Fig. 6c. Prop. químicas Perfil 6
meq/100gr
Ap
C1
Horizonte
CIC

Anexo III

Fig. 7a.Prop. químicas Perfil Si3

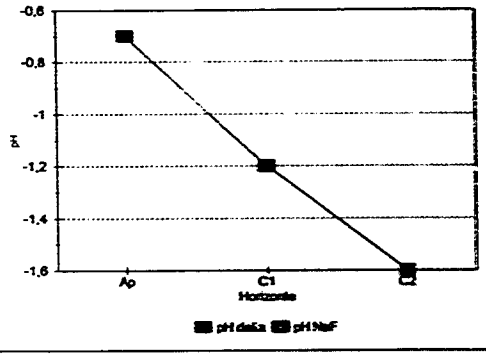


Fig. 7b.Prop. químicas Perfil Si3

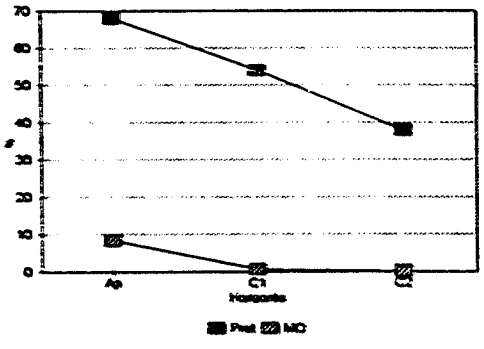


Fig. 7c.Prop. químicas Perfil Si3

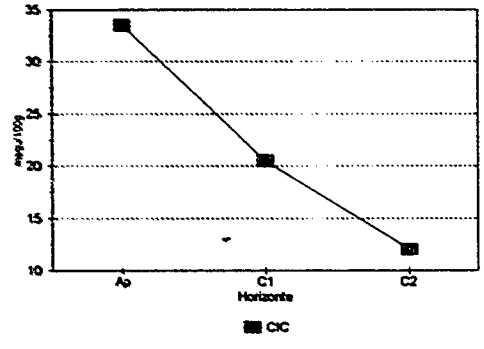


Fig. 8a. Prop. químicas Perfil 110

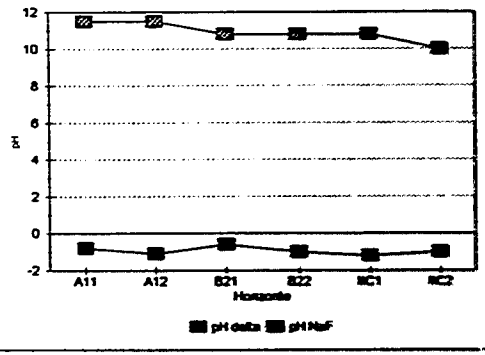


Fig. 8b. Prop. químicas Perfil 110

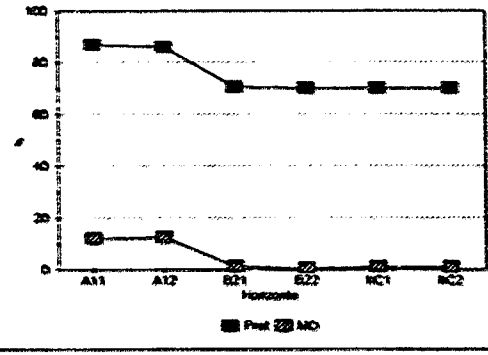


Fig. 8c. Prop. químicas Perfil 110

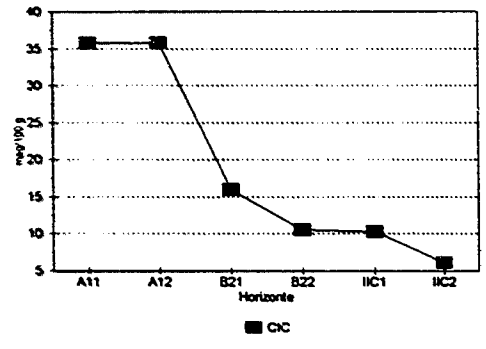


Fig. 9a. Prop. químicas Perfil Si1

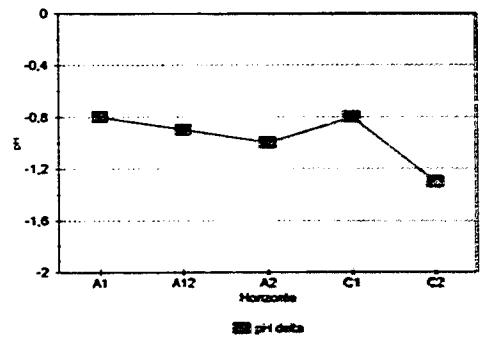


Fig. 9b. Prop. químicas Perfil Si1

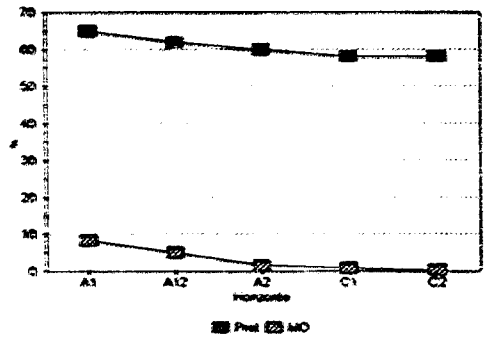


Fig. 9c. Prop. químicas Perfil Si1

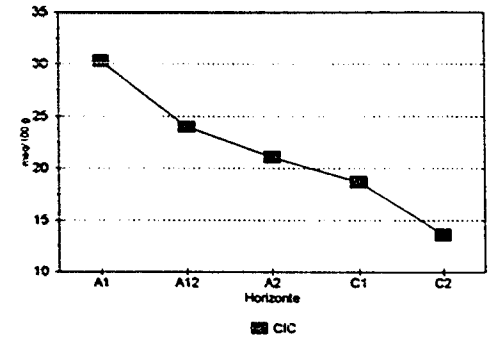


Fig. 10a. Prop. químicas Perfil Si2

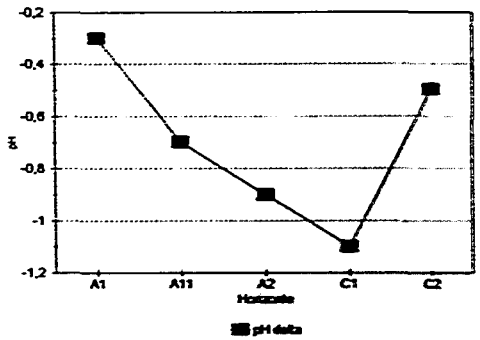


Fig. 10b. Prop. químicas Perfil Si2

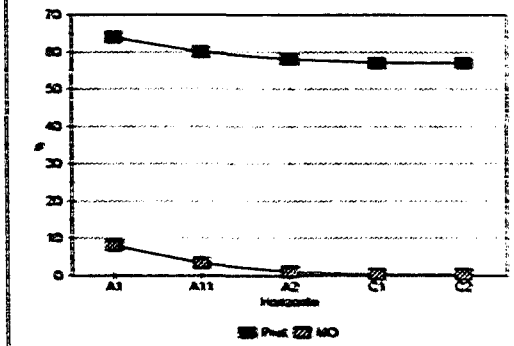


Fig. 10c. Prop. químicas Perfil Si2

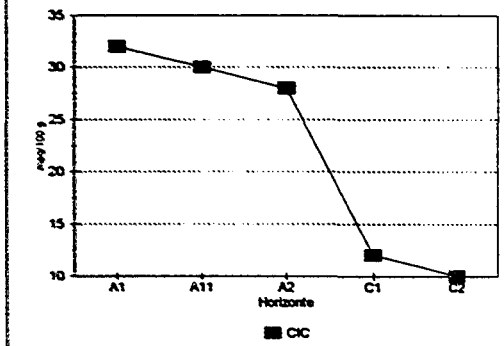


Fig.11a Propiedades químicas Perfil 15

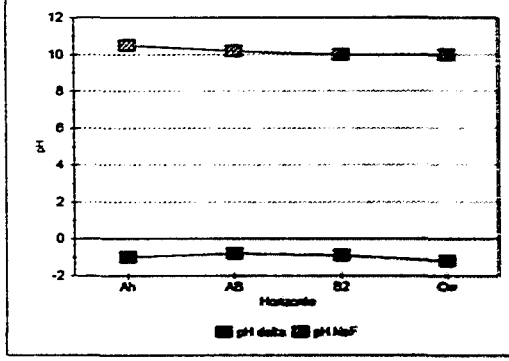


Fig.11b Propiedades químicas Perfil 15

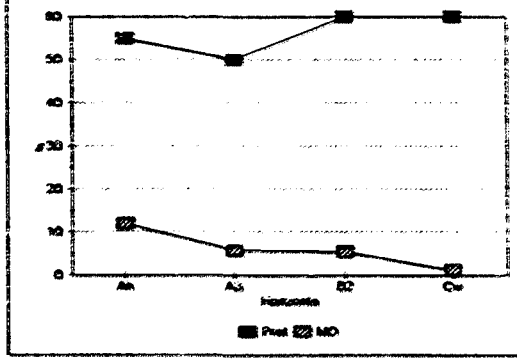


Fig.11c Propiedades químicas Perfil 15

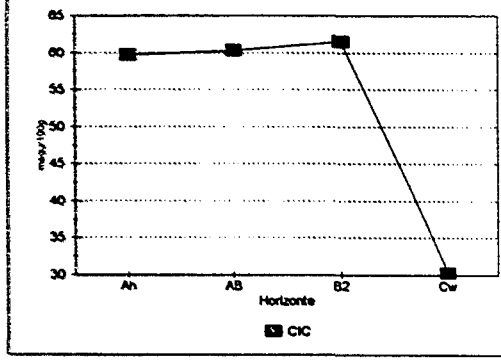


Fig. 12a Propiedades químicas Perfil 2

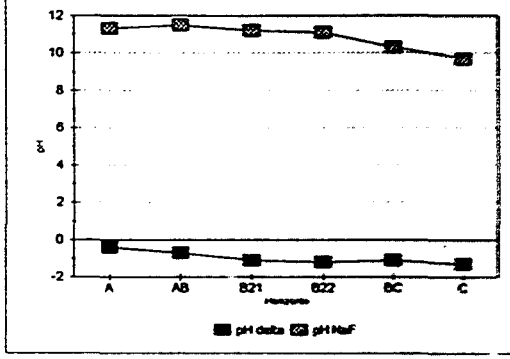


Fig. 12b Propiedades químicas Perfil 2

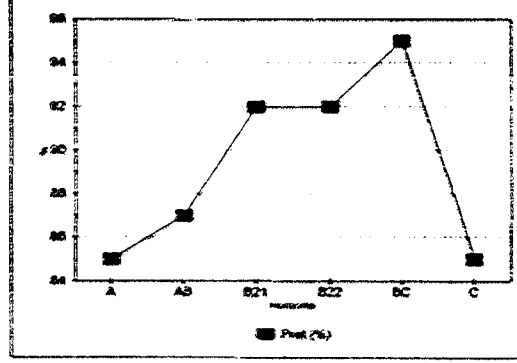
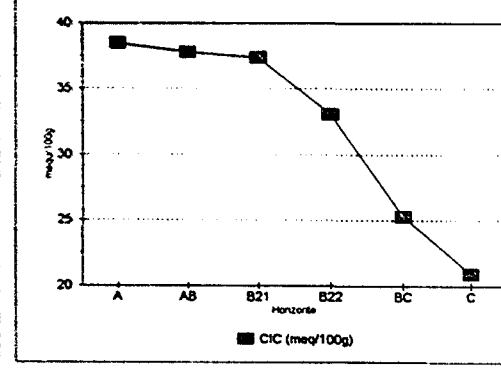


Fig. 12c Propiedades químicas Perfil 2



Anexo III

Fig. 13a Propiedades químicas Perfil 3

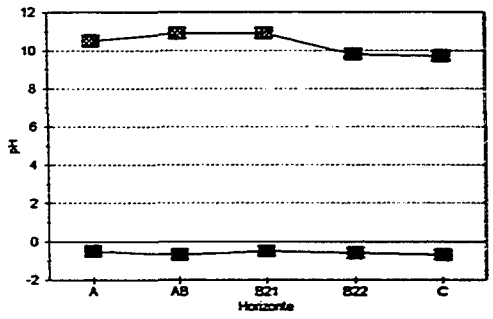


Fig. 13b Propiedades químicas Perfil 3

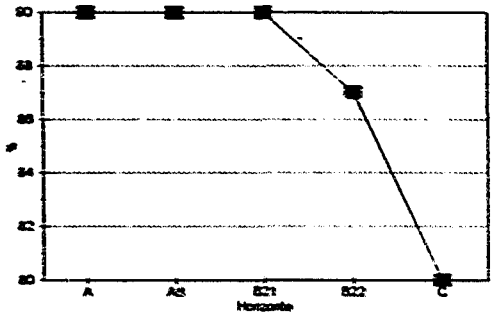


Fig. 13c Propiedades químicas Perfil 3

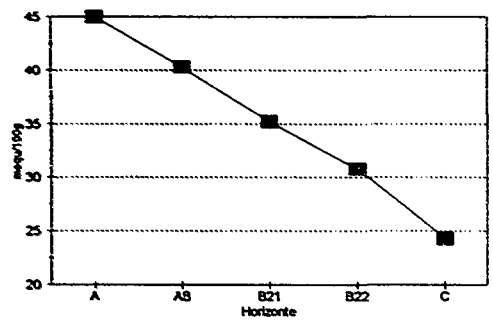


Fig. 14a. Prop. químicas Perfil Jal

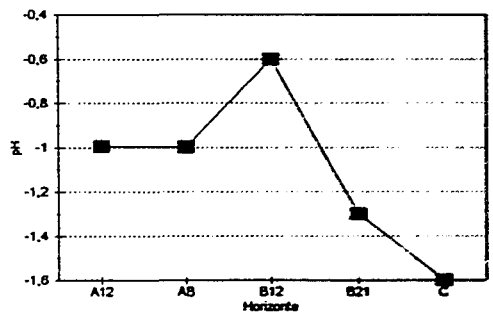


Fig. 14b. Prop. químicas Perfil Jal

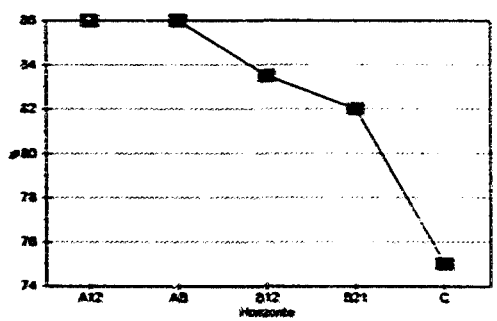


Fig. 14a. Prop. químicas Perfil Jal

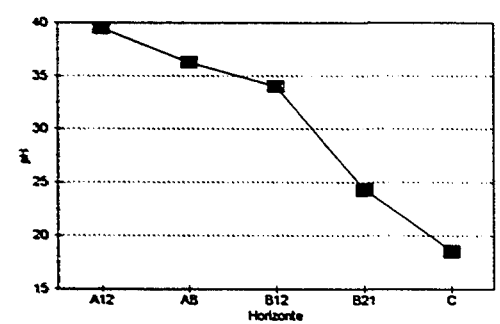


Fig. 15a. Prop. químicas Perfil 16

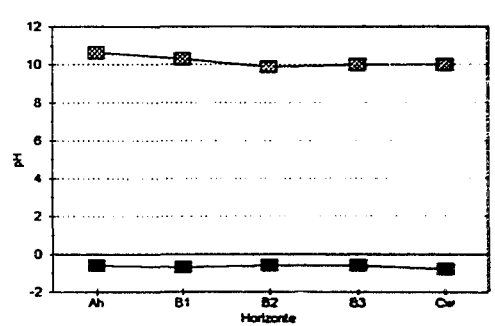


Fig. 15b. Prop. químicas Perfil 16

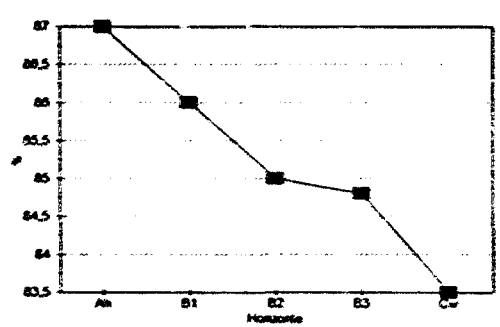
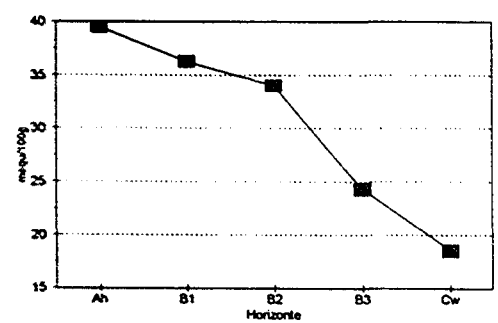


Fig. 15c. Prop. químicas Perfil 16



Anexo III

ANEXO IV

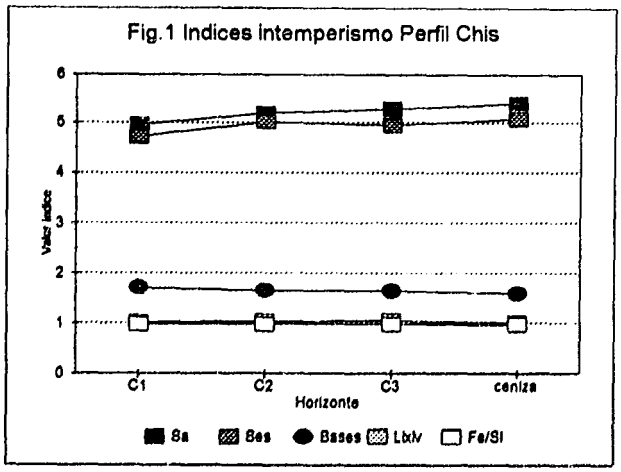


Fig.1 Indices intemperismo Perfil Chis
Valor índice
Horizonte
C1
C2
C3
ceniza
Sa
Ses
Bases
Lb/lv
Fe/Si

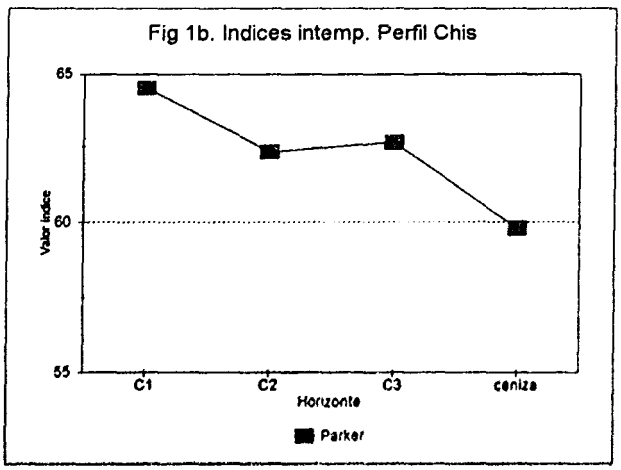


Fig 1b. Indices intemp. Perfil Chis
Valor índice
Horizonte
C1
C2
C3
ceniza
Parker

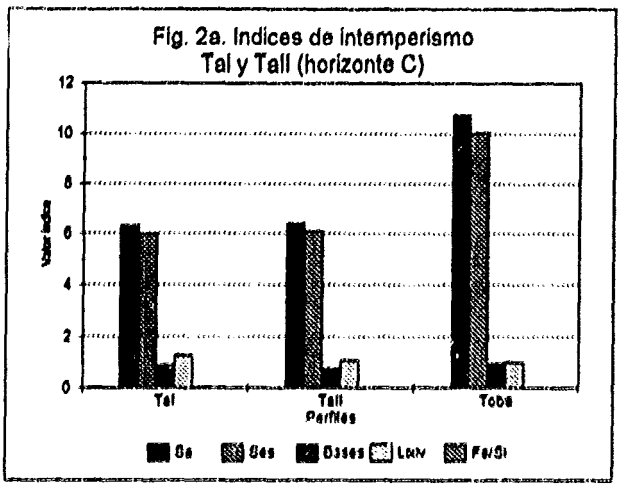


Fig. 2a. Indices de intemperismo
Tal y Tall (horizonte C)
Valor índice
Tal
Tall
Toba
Perfiles
Sa
Ses
Bases
Lb/lv
Fe/Si

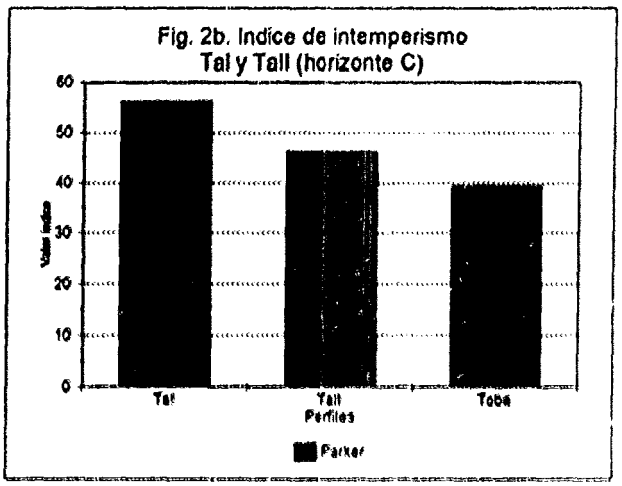


Fig. 2b. Indice de intemperismo
Tal y Tall (horizonte C)
Valor índice
Tal
Tall
Toba
Perfiles
Parker

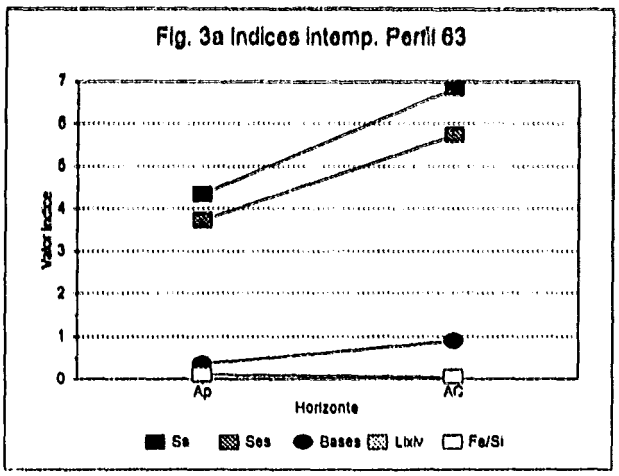


Fig. 3a Indices intemp. Perfil 63
Valor índice
Horizonte
Ap
AC
Sa
Ses
Bases
Lb/lv
Fe/Si

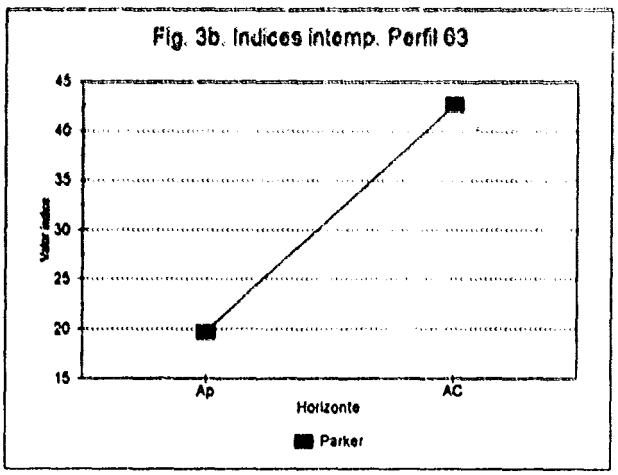


Fig. 3b. Indices intemp. Perfil 63
Valor índice
Horizonte
Ap
AC
Parker

Anexo IV

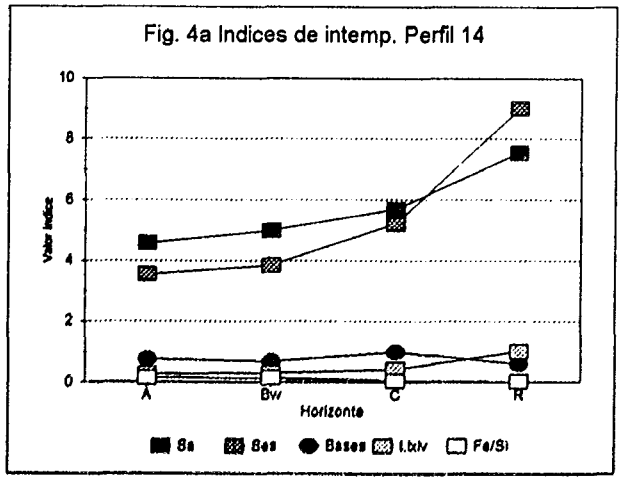


Fig. 4a Indices de intemp. Perfil 14
Valor índice
Horizonte
A
Bw
C
R
Sa
Ses
Bases
I.bt/v
Fe/Si

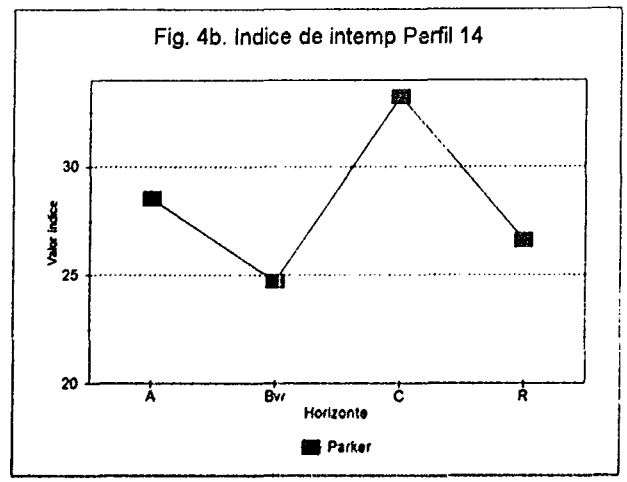


Fig. 4b. Indice de intemp Perfil 14
Valor índice
Horizonte
A
Bw
C
R
Parker

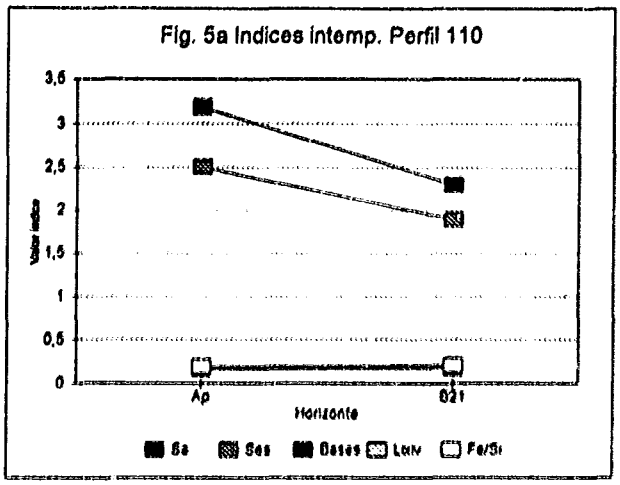


Fig. 5a Indices intemp. Perfil 110
Valor índice
Horizonte
Ap
B21
Sa
Ses
Bases
Lbt/v
Fe/Si

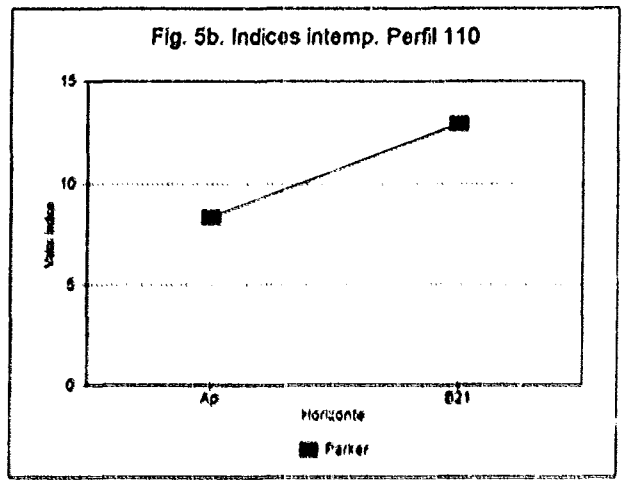


Fig. 5b. Indices intemp. Perfil 110
Valor índice
Horizonte
Ap
B21
Parker

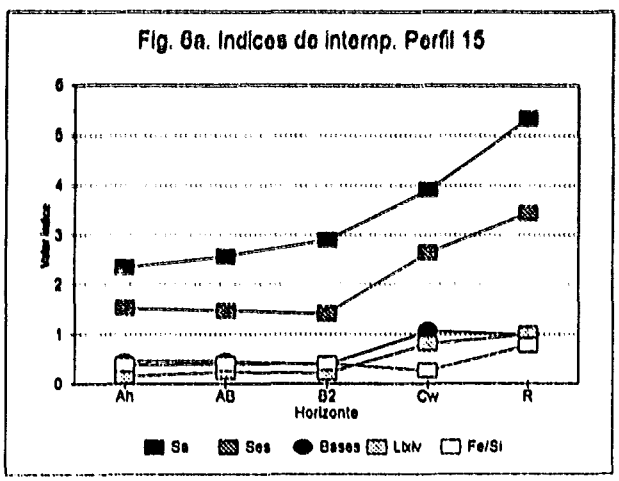


Fig. 6a. Indices de intemp. Perfil 15
Valor índice
Horizonte
Ah
AB
B2
Cw
R
Sa
Ses
Bases
Lbt/v
Fe/Si

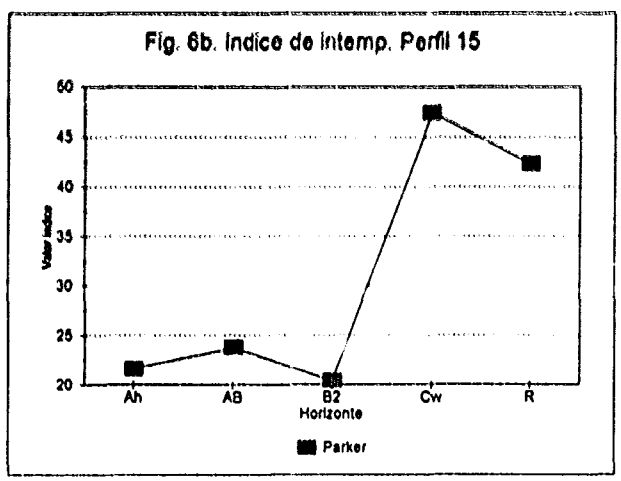


Fig. 6b. Indice de intemp. Perfil 15
Valor índice
Horizonte
Ah
AB
B2
Cw
R
Parker

Anexo IV

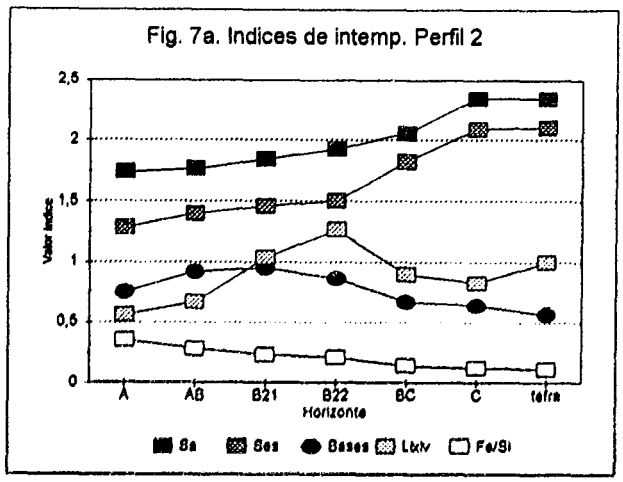


Fig. 7a. Indices de intemp. Perfil 2
2,5
2
1,5
1
0,5
0
Valor índice
A
AB
B21
B22
BC
C
tefra
Horizonte
Si
Ses
Bases
Lb/v
Fe/Si

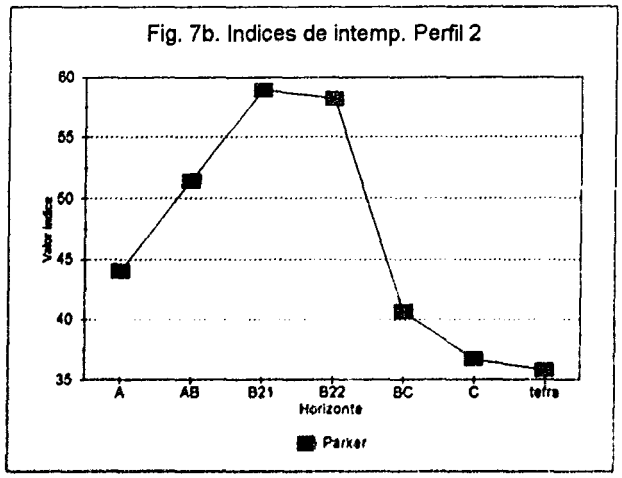


Fig. 7b. Indices de intemp. Perfil 2
60
55
50
45
40
35
Valor índice
A
AB
B21
B22
BC
C
tefra
Horizonte
Parker

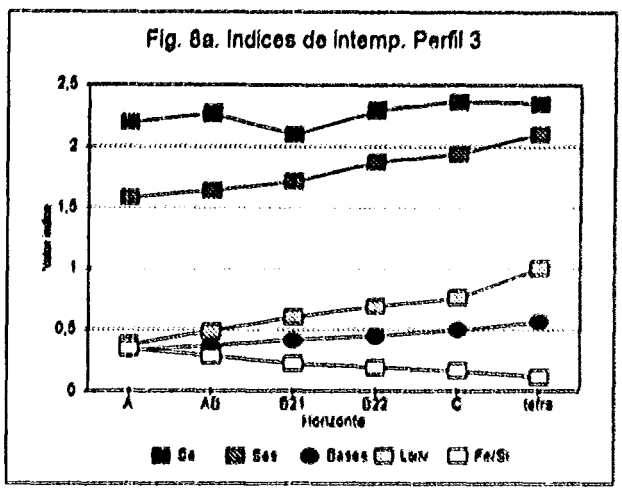


Fig. 8a. Indices de intemp. Perfil 3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
Valor índice
A
AB
B21
B22
C
tefra
Horizonte
Si
Ses
Bases
Lb/v
Fe/Si

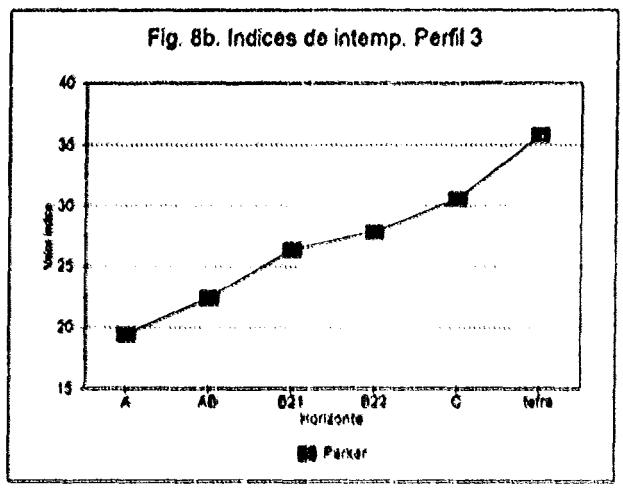


Fig. 8b. Indices de intemp. Perfil 3
40
35
30
25
20
15
Valor índice
A
AB
B21
B22
C
tefra
Horizonte
Parker

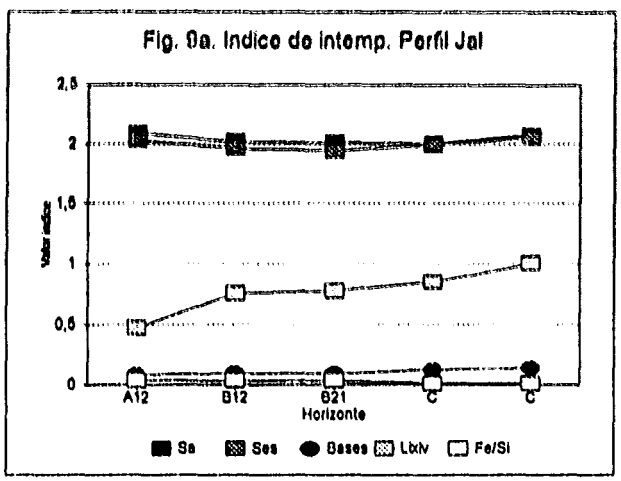


Fig. 9a. Indice de intemp. Perfil Jal
2,5
2
1,5
1
0,5
0
Valor índice
A12
B12
B21
C
C
Horizonte
Si
Ses
Bases
Lb/v
Fe/Si

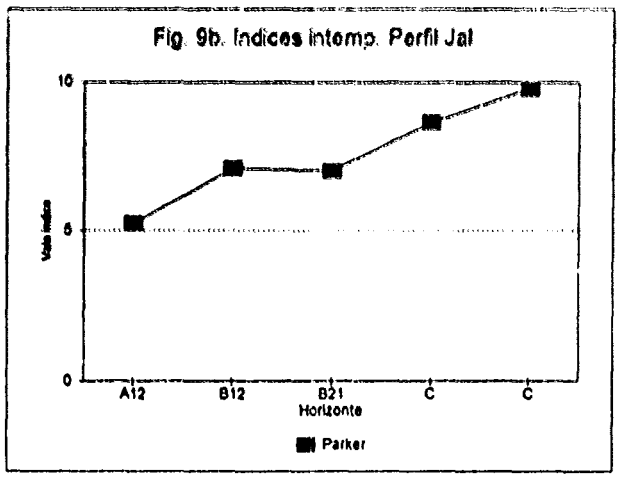


Fig. 9b. Indices intemp. Perfil Jal
10
5
0
Valor índice
A12
B12
B21
C
C
Horizonte
Parker

Anexo IV

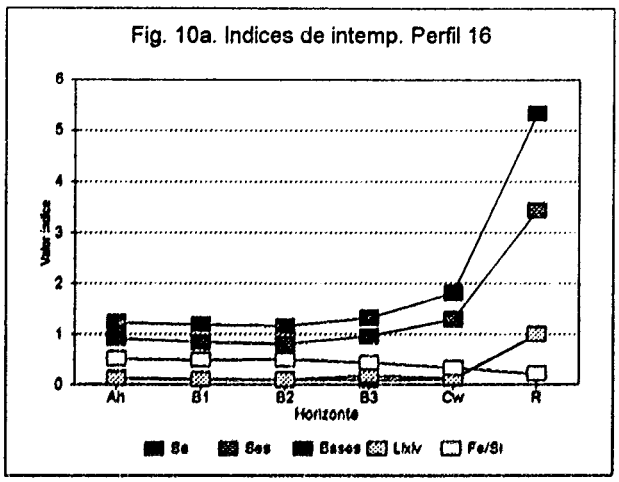


Fig. 10a. Indices de intemp. Perfil 16
Valor Indice
6
5
4
3
2
1
0
Ah
B1
B2
B3
Cw
R
Horizonte
Si
Sesi
Bases
Lix/v
Fe/Si

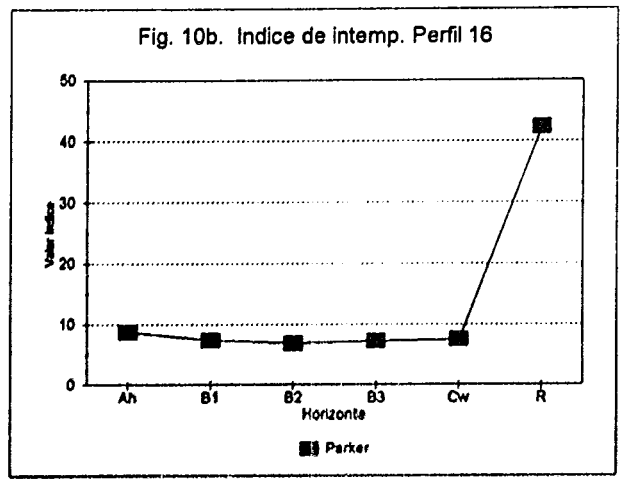


Fig. 10b. Indice de intemp. Perfil 16
Valor Indice
50
40
30
20
10
0
Ah
B1
B2
B3
Cw
R
Horizonte
Parker

Anexo IV

ANEXO V

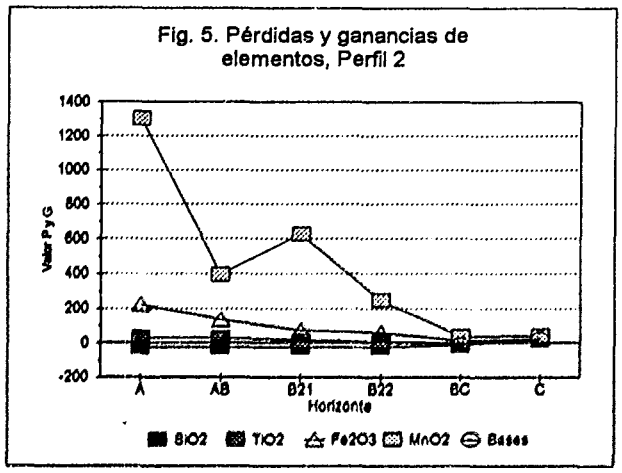


Fig. 5. Pérdidas y ganancias de elementos, Perfil 2
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
-200
Valor Py G
A
AB
B21
B22
BC
C
Horizonte
SiO2
TiO2
Fe2O3
MnO2
Bases

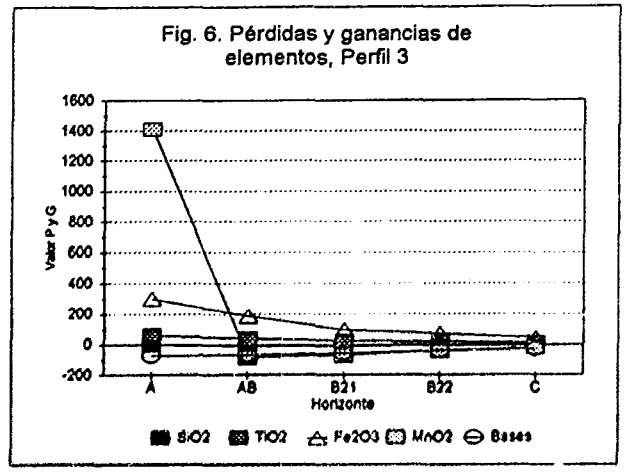


Fig. 6. Pérdidas y ganancias de elementos, Perfil 3
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
-200
Valor Py G
A
AB
B21
B22
C
Horizonte
SiO2
TiO2
Fe2O3
MnO2
Bases

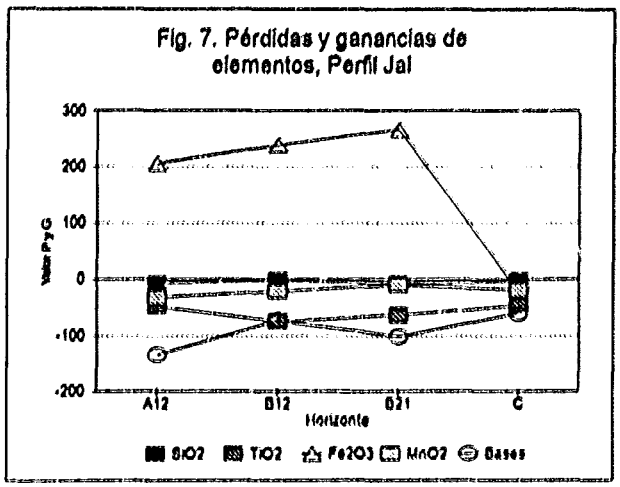


Fig. 7. Pérdidas y ganancias de elementos, Perfil Jal
300
200
100
0
-100
-200
Valor Py G
A12
B12
B21
C
Horizonte
SiO2
TiO2
Fe2O3
MnO2
Bases

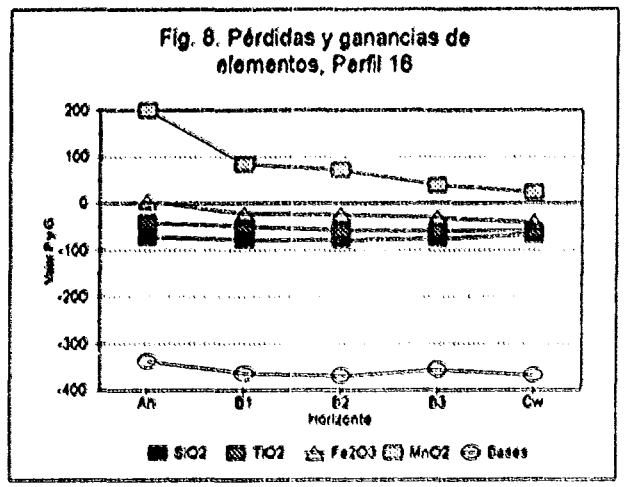


Fig. 8. Pérdidas y ganancias de elementos, Perfil 16
200
100
0
-100
-200
-300
-400
Valor Py G
Ah
B1
B2
B3
Cw
Horizonte
SiO2
TiO2
Fe2O3
MnO2
Bases

Anexo V

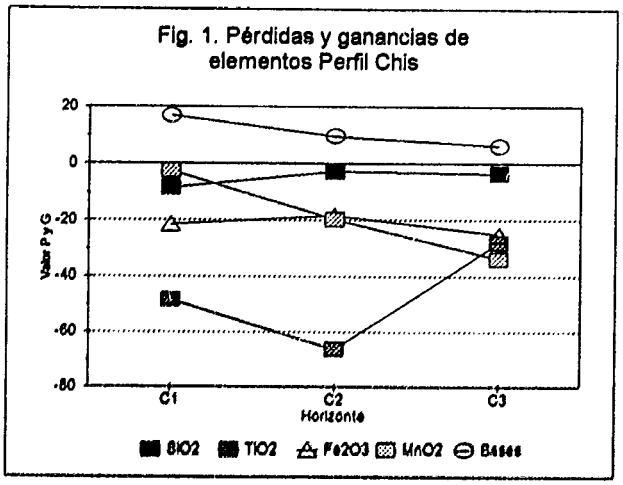


Fig. 1. Pérdidas y ganancias de elementos Perfil Chis
20
0
-20
-40
-60
-80
Valor P y G
C1
C2
C3
Horizonte
SiO2
TiO2
Fe2O3
MnO2
Bases

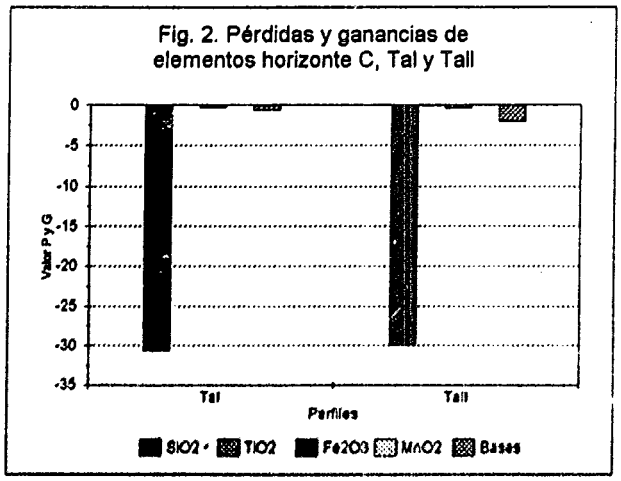


Fig. 2. Pérdidas y ganancias de elementos horizonte C, Tal y Tall
0
-5
-10
-15
-20
-25
-30
-35
Valor P y G
Tal
Tall
Perfiles
SiO2
TiO2
Fe2O3
MnO2
Bases

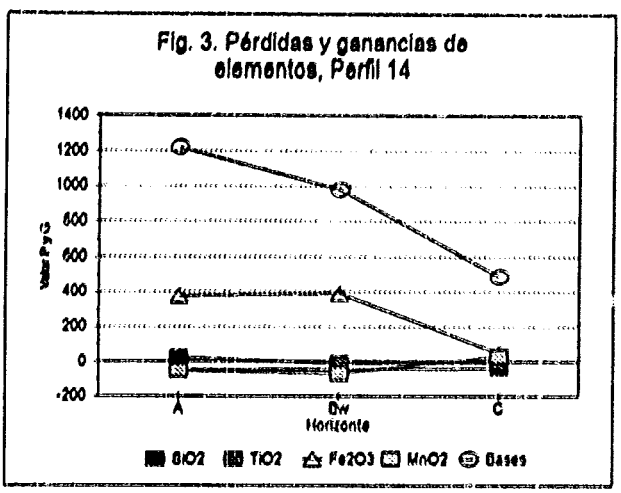


Fig. 3. Pérdidas y ganancias de elementos, Perfil 14
1400
1200
1000
600
600
400
200
0
-200
Valor P y G
A
Bw
C
Horizonte
SiO2
TiO2
Fe2O3
MnO2
Bases

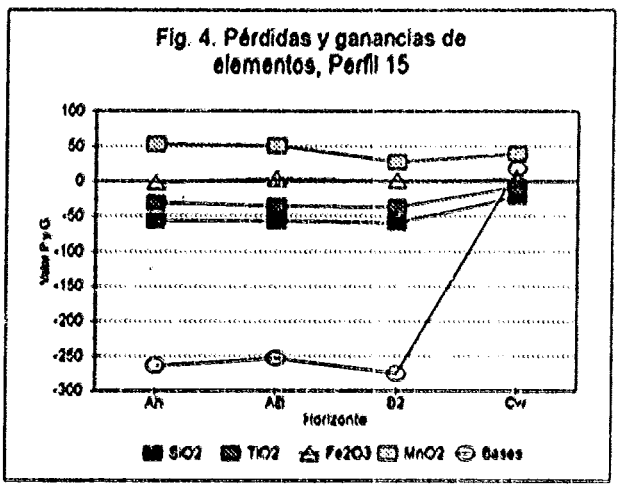


Fig. 4. Pérdidas y ganancias de elementos, Perfil 15
100
50
0
-50
-100
-150
-200
-250
-300
Valor P y G
Ah
AB
B2
Cw
Horizonte
SiO2
TiO2
Fe2O3
MnO2
Bases

Anexo V

ANEXO VI

Tabla 1. Valores ponderados del contenido de grava, arena, limo y arcilla

Perfil	*Horizonte*	*Grava %*	*Arena %*	*Limo %*	*Arcilla %*	*Total*	*Espesor cm*	*Grava %*	*Arena %*	*Limo %*	*Arcilla %*
Chis	C1	25	62	12.5	0.5	100	21	525	1302	262.5	10.5
	C2	38	48	13.7	0.3	100	62	2356	2976	849.4	18.6
	C3	43	50	6.5	0.5	100	41	1763	2050	266.5	20.5
	Total						124	37.45	51.03	11.12	0.40
Tall											
	A11		66	31	3	100	15		990	465	45
	A12		67	30	3	100	25		1675	750	75
	C		69	28	3	100	30		2070	840	90
	CR		72	26	2	100	55		3960	1430	110
	Total						125		69.56	27.88	2.56
Tal											
	A		69	28	3	100	15		1035	420	45
	B		64	29	7	100	45		2880	1305	315
	C		75	23	2	100	60		4500	1380	120
	Total						120		70.13	25.88	4.00
63											
	Ap		62.7	22	15.3	100	30		580	220	200
	AC		72.7	14	13.3	100	33		940	500	560
	C		87.1	7.3	5.6	100	62		960	540	500
	Total						125		2520	2100	2380
14											
	A	1	60	29	10	100	17	17	1020	493	170
	Bw	3	50	30	17	100	23	69	1150	690	391
	C	10	75	10	5	100	7	70	525	70	35
	Total						47	3.32	57.34	26.66	12.68
6											
	Ap		43.6	52	4.4	100	20		580	220	200
	C1		55.1	34	10.9	100	20		940	500	560
	Total						40		960	540	500
110											
	A11		60.7	33.3	6	100	15		910.5	499.5	90
	A12		60.7	31.3	8	100	25		1517.5	782.5	200
	B21		87.3	8.7	4	100	33		2880.9	287.1	132
	B22		85.3	10.7	4	100	33		2814.9	353.1	132
	IIC1		85.3	10.7	4	100	44		3753.2	470.8	176
	IIC2		75.3	20.7	4	100	50		3765	1035	200
	Total						200		78.21	17.14	4.65
Si1	A1		74	20	6	100	10		740	200	60
	A12		68	22	10	100	20		1360	440	200
	A2		62	18	20	100	30		1860	540	600
	C1		77	15	8	100	50		3850	750	400
	C2		70	12	18	100	90		6300	1080	1620
	Total						200		70.55	15.05	14.40

Tabla 1. (continuación)

Perfil	Horizonte	Grava %	Arena %	Limo %	Arcilla %	Total	Espesor cm	Grava %	Arena %	Limo %	Arcilla %
Si2											
	A1		58	22	20	100	10		580	220	200
	A11		47	25	28	100	20		940	500	560
	A2		48	27	25	100	20		960	540	500
	C1		36	30	34	100	70		2520	2100	2380
	C2		38	25	37	100	80		3040	2000	2960
	Total						200		40.20	26.80	33.00
15											
	A		28	48	24	100	13		364	624	312
	AB		25	49	26	100	22		550	1078	572
	B2		25	55	20	100	10		250	550	200
	Cw		65	34	1	100	35		2275	1190	35
	Total						80		42.99	43.03	13.99
2											
	A		45	29	26	100	21		945	609	546
	AB		35	45	20	100	17		595	765	340
	B21		26	50	24	100	27		702	1350	648
	B22		26	55	19	100	42		1092	2310	798
	BC		32	50	18	100	53		1696	2650	954
	C		40	42	18	100	20		800	840	360
	Total						180		32.39	47.36	20.26
3											
	A		42	35	23	100	27		1134	945	621
	AB		45	32	23	100	18		810	576	414
	B21		50	25	25	100	45		2250	1125	1125
	B22		52	29	19	100	60		3120	1740	1140
	C		55	32	13	100	20		1100	640	260
	Total						170		49.49	29.56	20.94
Jal											
	A12		43.6	31.4	25	100	10		436	314	250
	AB		59.6	20.4	20	100	31		1847.6	632.4	620
	B12		53.6	31.4	15	100	12		643.2	376.8	180
	B21		45.6	34.4	20	100	21		957.6	722.4	420
	C		39.6	24.4	36	100	17		673.2	414.8	612
	Total						91		50.08	27.04	22.88
16											
	A		15	55	30	100	16		240	880	480
	B1		15	50	35	100	29		435	1450	1015
	B2	3	14	50	33	100	46	138	644	2300	1518
	B3	20	5	60	15	100	39	780	195	2340	585
	Cw	50	8	40	2	100	50	2500	400	2000	100
	Total						180	18.99	10.63	49.83	20.54

Tabla 2. Valores ponderados de los resultados de los balances geoquímicos.

Perfil	Horizonte	SiO_2	TiO_2	Fe_2O_3	MnO_2	Bases	Espesor (cm)	SiO_2	TiO_2	Fe_2O_3	MnO_2	Bases
Tall	C1	-8.30	-48.42	-21.39	-2.42	16.93	21	-174.30	-1.016.84	-449.23	-50.77	355.58
	C2	-2.57	-66.36	-18.23	-19.72	9.63	62	-159.61	-4.114.22	-1.130.39	-1.222.56	596.96
	C3	-3.40	-27.99	-25.14	-33.90	6.04	41	-139.42	-1.147.39	-1.030.67	-1.390.00	247.74
	Total						124	-4.51	-49.46	-16.62	21.79	8.49
Tal	C	-30.60	0.17	-0.25	0.01	-0.57		-30.60	0.17	-0.25	0.01	-0.57
	Total	-29.91	-0.03	-0.36	0.00	-2.04		-29.91	-0.03	-0.36	0.00	-2.04
14	A	-51.17	21.24	374.20	-51.89	1.218.41	17	-869.83	361.14	6.361.35	-882.09	20.713.05
	Bw	-46.81	-11.12	388.40	-69.22	977.60	23	-1.076.66	-255.73	8.933.15	-1.592.03	22.484.90
	C	-38.94	-4.41	46.82	31.09	485.50	7	-272.61	-30.88	327.76	217.65	3.398.52
	Total						47	-47.22	1.59	332.39	-48.01	991.41
15	Ah	-75.60	198.79	781.52	-43.40	1.177.27	13	-985.44	2.584.32	10.159.81	-564.22	15.304.47
	AB	-76.07	177.48	835.53	-44.03	1.213.90	22	-1.673.48	3.904.53	18.381.55	-968.69	26.705.77
	B2	-76.16	164.27	849.77	-50.82	984.98	10	-761.65	1.842.72	8.497.72	-508.15	9.849.82
	Cw	-67.55	200.10	593.33	-60.99	2.053.84	35	-2.364.22	7.003.55	20.766.67	-2.134.70	71.884.29
	Total						80	-72.31	191.69	722.57	-52.20	1.546.80
2	A	-24.37	30.92	222.66	1.302.75	174.39	21	-511.71	649.36	4.675.83	27.357.65	3.662.20
	AB	-23.53	27.54	135.47	394.32	249.00	17	-400.07	468.18	2.302.92	6.700.45	4.233.05
	B21	-23.79	13.57	73.53	626.46	284.49	27	-642.24	366.49	1.985.28	16.914.99	7.681.13
	B22	-22.59	4.93	59.32	246.70	250.83	42	-948.94	206.99	2.491.31	10.361.55	10.534.80
	BC	-11.96	2.21	11.30	37.59	40.34	53	-634.05	116.95	598.77	1.992.05	2.138.16
	C	20.67	24.69	27.09	40.27	89.69	20	417.43	493.77	541.89	805.49	1.797.78
	Total						180	-15.11	12.79	69.98	356.31	166.93
3	A	-1.02	60.75	300.91	1.410.38	-72.26	27	-27.56	1.640.18	8.124.64	38.080.19	-1.951.02
	AB	-6.73	38.63	166.69	-83.73	-66.07	18	-121.17	693.54	3.358.55	-1.507.13	-1.225.23
	B21	-10.03	23.47	97.43	-71.00	-55.84	45	-451.33	1.056.27	4.384.27	-3.194.84	-2.512.67
	B22	-3.28	21.38	74.41	-42.20	-37.51	60	-196.83	1.282.53	4.464.45	-2.532.13	-2.250.77
	C	-4.55	12.65	46.93	-18.43	-29.46	20	-91.09	252.96	938.52	-368.55	-589.54
	Total						170	-5.22	28.97	125.12	179.28	-50.17
Jal	A12	-7.31	-46.63	205.73	-32.06	-134.03	10	-73.08	-466.30	2.057.28	-320.61	-1.340.26
	B12	-1.79	-75.46	236.66	-21.60	-73.06	31	-55.44	-2.339.19	7.309.20	-669.63	-2.264.86
	B21	-0.26	-63.83	266.62	-10.46	-101.64	12	-98.97	-766.01	3.198.20	-125.57	-1.219.71
	C	-3.32	-46.40	-22.95	-20.09	-60.01	21	-69.81	-974.36	-481.69	-421.96	-1.260.13
	Total						74.	-4.02	-61.46	164.50	-20.78	-82.23
16	Ah	-84.52	225.00	836.00	11.43	67.20	16	-1.352.37	3.600.00	13.376.00	182.86	1.075.27
	B1	-87.60	178.57	596.80	-31.90	-156.39	29	-2.540.32	5.178.57	17.307.20	-925.24	-4.593.41
	B2	-88.08	132.14	582.50	-36.16	-156.83	46	-4.051.68	6.078.57	26.795.00	-1.663.39	-7.214.13
	B3	-86.34	128.57	517.60	-46.57	-195.38	39	-3.367.38	5.014.29	20.186.40	-1.894.29	-7.619.84
	Cw	-82.32	127.17	424.77	-54.57	-164.28	50	-4.116.25	6.358.67	21.238.53	-2.728.27	-8.214.09
	Total						180	-85.71	145.72	540.46	-39.05	-147.59

Tabla 3. Valores ponderados de la relación Sa, el índice de Parker y la relación Fes

Perfil	*Horizonte*	*Sa*	*Parker*	*Fes*	*Espesor*	*Sa*	*Parker*	*Fes*
Chis	C1	4.95	64.52	0.03	21	103.96	1354.93	0.56
	C2	5.28	62.33	0.03	62	327.26	3864.23	1.61
	C3	5.19	62.65	0.02	41	212.69	131.49	0.99
	Total				124	5.19	43.15	0.03
Tala	I	6.29	56.29	0.02	15	94.35	844.35	0.26
	II	6.39	46.29	0.03	45	287.55	2083.05	1.21
	Toba	10.74	39.50	0.02	60	644.43	2370.00	1.01
	Total				120	8.55	44.15	0.02
63	Ap	4.342	19.669	0.105	20	86.84	393.37	2.10
	AC	6.838	42.658	0.054	20	136.76	853.16	1.08
	Total				40	5.59	31.16	0.08
14	A	4.58	28.54	0.14	17	77.87	485.12	2.46
	Bw	5.00	24.72	0.14	23	114.92	568.48	3.17
	C	5.70	33.21	0.04	7	39.90	232.50	0.28
	Total				47	4.95	27.36	0.13
110	A12	3.18	8.32	0.19	25	79.75	208.10	2.85
	B21	2.30	13.00	0.20	33	75.90	428.67	6.60
	Total				58	2.68	10.98	0.20
15	Ah	2.35	21.63	0.38	13	30.52	281.16	4.94
	AB	2.31	23.80	0.40	22	50.72	523.50	8.77
	B2	2.20	20.40	0.40	10	22.00	204.04	4.04
	Cw	4.14	47.38	0.27	35	144.96	1658.42	9.32
	Total				80	3.10	33.34	0.34
2	A	1.75	44.03	0.36	21	36.73	924.68	7.56
	AB	1.77	51.44	0.28	17	30.01	874.49	4.76
	B21	1.74	58.90	0.23	27	47.05	1590.34	6.21
	B22	1.77	58.19	0.21	42	74.45	2444.02	8.82
	BC	2.05	40.63	0.14	53	108.91	2153.45	7.42
	C	2.34	36.73	0.12	20	46.89	734.55	2.40
	Total				180	1.91	48.45	0.21
3	A	2.30	19.41	0.34	27	61.99	524.19	9.18
	AB	2.17	22.41	0.28	18	38.99	403.41	5.04
	B21	2.10	26.32	0.22	45	94.28	1184.56	9.90
	B22	2.24	27.79	0.19	60	134.42	1667.10	11.40
	C	2.26	30.59	0.16	20	45.14	611.74	3.20
	Total				170	2.20	25.83	0.23
Jal	A12	2.09	5.24	0.04	10	20.86	52.35	0.36
	B12	2.02	7.07	0.03	31	62.53	219.32	1.04
	B21	2.00	6.99	0.03	12	23.95	83.83	0.41
	C	2.01	8.63	0.01	21	42.11	16.93	0.19
	C	2.07	9.76	0.01	17	35.22	166.00	0.15
	Total				91	2.03	5.92	0.02
16	Ah	1.44	8.73	0.51	16	23.05	139.73	8.18
	B1	1.19	7.40	0.49	29	34.51	214.69	14.18
	B2	1.14	6.91	0.49	46	52.54	318.07	22.73
	B3	1.32	7.27	0.43	39	51.61	283.72	16.88
	Cw	1.72	7.58	0.33	50	85.78	378.87	16.67
	Total				180	1.37	7.42	0.44

Tabla 4. Valores ponderados para las propiedades químicas Pret y CIC

Perfil	Horizonte	Pret (%)	CIC (meq/100g)	Espesor (cm)	Pret (%)	CIC (meq/100g)
Chis	C1	2.00	7.50	21	42.00	157.50
	C2	1.00	6.30	62	62.00	390.60
	C3	0.00	6.00	41	0.00	246.00
	Total			124	0.84	6.40
Tall	A11	2.00	5.00	15	30.00	75.00
	A12	1.00	5.00	25	25.00	125.00
	C	0.00	5.00	30	0.00	150.00
	CR	0.00	5.00	55	0.00	275.00
	Total			125	0.44	5.00
Tal	A	2.00	6.10	15	30.00	91.50
	B	1.00	6.40	45	45.00	288.00
	C	0.00	4.00	60	0.00	240.00
	Total			120	0.63	5.16
63	Ap	60.2	21.4	15	1806	642
	AC	58	14.3	25	1914	471.9
	C	50.6	8	33	3137.2	496
	Total			33	54.86	12.88
14	A	63.00	25.30	17	1.071.00	430.10
	Bw	75.00	20.00	23	1.725.00	460.00
	C	60.00	14.20	7	420.00	99.40
	Total			47	68.43	21.05
6	Ap	72.3	21.3	20	1446	426
	C1	63.4	25	20	1268	500
	Total			40	67.85	23.15
SI3	Ap	68	33.5	90	6120	3015
	C1	55	20.5	50	2750	1025
	C2	35	12	60	2100	720
	Total			200	54.85	23.80
110	A11	86.90	35.80	15	1.303.50	537.00
	A12	86.00	35.80	25	2.150.00	895.00
	B21	70.50	16.00	33	2.326.50	528.00
	B22	70.00	10.50	33	2.310.00	346.50
	IIC1	70.00	10.30	44	3.080.00	453.20
	IIC2	70.00	6.10	50	3.500.00	305.00
	Total			200	66.83	12.64
SI1	A1	74.00	30.30	10	740.00	303.00
	A12	70.00	24.00	20	1.400.00	480.00
	A2	70.00	21.10	30	2.100.00	633.00
	C1	70.00	18.70	50	3.500.00	935.00
	C2	70.00	13.60	90	6.300.00	1.224.00
	Total			200	70.20	17.88

e

Tabla 4.(continuación)

Perfil	Horizonte	Pret (%)	CIC (meq/100g)	Espesor (cm)	Pret (%)	CIC (meq/100g)
Si2	A1	74.00	32.00	10	740.00	320.00
	A11	70.00	30.00	20	1.400.00	600.00
	A2	70.00	28.00	20	1.400.00	560.00
	C1	70.00	12.00	70	4.900.00	840.00
	C2	70.00	10.00	80	5.600.00	800.00
	Total			200	70.20	15.60
15	Ah	55.00	59.70	13	715.00	776.10
	AB	50.00	60.30	22	1.100.00	1.326.60
	B2	60.00	61.50	10	600.00	615.00
	Cw	60.00	30.30	35	2.100.00	1.060.50
	Total			80	56.44	47.23
2	A	85.00	38.50	21	1.785.00	808.50
	AB	87.00	37.80	17	1.479.00	642.60
	B21	92.00	37.40	27	2.484.00	1.009.80
	B22	92.00	33.10	42	3.864.00	1.390.20
	BC	95.00	25.30	53	5.035.00	1.340.90
	C	85.00	20.90	20	1.700.00	418.00
	Total			180	90.82	31.17
3	A	90.00	45.00	27	2.430.00	1.215.00
	AB	90.00	40.30	18	1.620.00	725.40
	B21	90.00	35.20	45	4.050.00	1.584.00
	B22	87.00	30.80	60	5.220.00	1.848.00
	C	80.00	24.30	20	1.600.00	486.00
	Total			170	87.76	34.46
16	Ah	87.00	39.50	16	1.392.00	632.00
	B1	88.00	31.10	29	2.494.00	901.90
	B2	85.00	22.40	46	3.910.00	1.030.40
	B3	85.00	36.20	39	3.315.00	1.411.80
	Cw	85.00	40.50	50	4.250.00	2.025.00
	Total			180	85.34	33.34

Tabla 5. Valores ponderados para las propiedades físicas: DRP, DA, %H_2O y Est.

Perfil	Horizonte	DRP	DA (g/cm^3)	H_2O (%)	Est	Espesor (cm)	DRP	DA (g/cm^3)	H_2O (%)	Est
Chis	C1	8.00	0.75	3.10	0.21	21	168.00	15.75	65.10	4.40
	C2	5.00	0.78	2.70	0.30	62	310.00	48.36	167.40	18.34
	C3	0.00	0.83	1.60	0.14	41	0.00	34.03	65.60	5.74
	Total					124	3.85	0.79	2.40	0.23
Tall	A11	13.00	1.30	2.50	0.52	15	195.00	19.50	37.50	7.80
	A12	13.00	1.35	2.85	0.49	25	325.00	33.75	71.25	12.25
	C	5.00	1.40	2.60	0.45	30	150.00	42.00	78.00	13.50
	CR	0.00	1.50	2.60	0.39	55	0.00	82.50	143.00	21.45
	Total					125	5.36	1.42	2.64	0.44
Tal	A	15.00	1.15	2.33	0.45	15	225.00	17.25	34.95	6.75
	B	22.50	1.17	2.91	0.56	45	1012.50	52.65	130.95	25.20
	C	0.00	1.35	2.30	0.33	60	0.00	81.00	138.00	19.80
	Total					120	10.31	1.26	2.53	0.43
63	Ap	17	0.87	18.5	0.59	30	510.00	26.10	555.00	17.85
	AC	16	0.89	12.3	0.38	33	528.00	29.37	405.90	12.39
	C	0	0.87	10.5	0.15	62	0.00	53.94	651.00	9.18
	Total					125	8.30	0.88	12.90	0.32
14	A	15.00	0.75	14.70	0.65	17	255.00	12.75	249.90	11.05
	Bw	21.50	0.83	12.50	0.94	23	494.50	19.09	287.50	21.62
	C	0.00	0.92	3.70	0.20	7	0.00	6.44	25.90	1.40
	Total					47	15.95	0.81	11.99	0.72
6	Ap	9	0.69	28	1.29	20	180.00	13.80	560.00	25.87
	C	0	0.79	22.7	0.81	20	0.00	15.80	454.00	16.30
	Total					40	4.50	0.74	25.35	1.05
Sl3	Ap	10	0.7	25	0.74	90	900.00	63.00	2250.00	66.25
	C1	8	0.76	20	0.70	50	400.00	38.00	1000.00	35.03
	C2	0	0.75	12	2.01	60	0.00	45.00	720.00	120.72
	Total					200	6.50	0.73	19.85	1.11
110	A11	22.00	0.50	25.00	1.19	15	330.00	7.50	375.00	17.85
	A12	23.00	0.54	24.00	1.46	25	575.00	13.50	600.00	36.50
	B21	13.00	0.74	18.00	1.68	33	429.00	24.42	594.00	55.44
	B22	13.00	0.77	15.00	2.31	33	429.00	25.41	495.00	76.23
	IIC1	3.00	0.83	15.00	4.71	44	132.00	36.52	660.00	207.24
	IIC2	0.00	0.91	15.00	6.09	50	0.00	45.50	750.00	304.50
	Total					200	9.48	0.76	17.37	3.49
Sl1	A1	11.00	0.82	32.50	0.27	10	110.00	8.20	325.00	2.70
	A12	6.00	0.78	30.00	0.35	20	120.00	15.60	600.00	7.06
	A2	10.00	0.80	25.00	0.47	30	300.00	24.00	750.00	14.12
	C1	10.00	0.80	22.00	0.24	50	500.00	40.00	1100.00	12.16
	C2	0.00	0.82	20.00	0.32	90	0.00	73.80	1800.00	28.42
	Total					200	5.15	0.81	22.88	0.32
Sl2	A1	22.00	0.80	33.30	0.72	10	220.00	8.00	333.00	7.24
	A11	12.00	0.84	28.40	1.12	20	240.00	16.80	568.00	22.31
	A2	9.00	0.88	22.00	1.17	20	180.00	17.60	440.00	23.48
	C1	10.00	0.92	21.00	2.33	70	700.00	64.40	1470.00	163.33
	C2	0.00	0.92	18.00	1.50	80	0.00	73.60	1440.00	120.00
	Total					200	6.70	0.90	21.26	1.68

Tabla 5. Valores ponderados para las propiedades físicas: DRP, DA, %H_2O y Est.

Perfil	Horizonte	DRP	DA (g/cm^3)	H_2O (%)	Est	Espesor (cm)	DRP	DA (g/cm^3)	H_2O (%)	Est
15	Ah	25.00	0.71	33.30	2.57	13	325.00	9.23	432.90	33.43
	AB	27.00	0.75	35.80	3.00	22	594.00	16.50	787.60	66.00
	B2	35.00	0.80	45.60	3.00	10	350.00	8.00	456.00	30.00
	Cw	0.00	0.85	15.10	0.54	35	0.00	29.75	528.50	18.85
	Total					80	15.86	0.79	27.56	1.85
2	A	24.00	0.83	33.20	1.22	21	504.00	17.43	697.20	25.67
	AB	22.50	0.85	33.30	1.86	17	382.50	14.45	566.10	31.57
	B21	21.50	0.87	37.70	2.85	27	580.50	23.49	1017.90	76.85
	B22	23.50	0.87	40.00	2.85	42	987.00	36.54	1680.00	119.54
	BC	17.00	0.89	22.50	2.13	53	901.00	47.17	1192.50	112.83
	C	0.00	0.92	16.30	1.50	20	0.00	18.40	326.00	30.00
	Total					180	18.64	0.87	30.44	2.20
3	A	19.40	0.82	32.70	1.38	27	523.80	22.14	882.90	37.29
	AB	18.60	0.83	33.20	1.22	18	334.80	14.94	597.60	22.00
	B21	23.70	0.85	34.20	1.00	45	1066.50	38.25	1539.00	45.00
	B22	25.50	0.85	30.00	0.92	60	1530.00	51.00	1800.00	55.38
	C	0.00	0.87	28.00	0.82	20	0.00	17.40	560.00	16.36
	Total					170	20.32	0.85	31.64	1.04
Jal	A11	25.00	0.65	32.70	0.94	10	250.00	6.50	327.00	9.40
	A12	20.00	0.79	32.00	0.98	31	620.00	24.49	992.00	30.38
	B12	20.00	0.86	33.20	1.29	12	240.00	10.32	398.40	15.48
	B21	22.00	0.89	34.20	0.87	21	462.00	18.69	718.20	18.27
	C	0.00	0.81	30.00	1.19	17	0.00	13.77	510.00	20.23
	Total					91	17.27	0.81	28.78	1.03
16	Ah	25.00	0.72	45.20	5.66	16	400.00	11.52	723.20	90.56
	B1	21.00	0.70	46.00	5.66	29	609.00	20.30	1334.00	164.14
	B2	30.00	0.78	39.70	6.28	46	1380.00	35.88	1826.20	288.88
	B3	20.00	0.85	35.10	3.00	39	780.00	33.15	1368.90	117.00
	Cw	0.00	1.20	25.20	0.72	50	0.00	60.00	1260.00	36.00
	Total					180	16.09	0.89	36.18	3.87

ANEXO VII

SÍNTESIS

I. INTRODUCCIÓN

Una de las mayores dificultades para determinar la edad de los suelos reside en que se debe tener en consideración la velocidad de pedogénesis, en función de las condiciones climáticas y de la naturaleza del material parental, principalmente. Asimismo, hay que considerar que los suelos, en su etapa inicial evolucionan rápidamente hasta alcanzar un cierto grado de madurez y, posterioremente, su desarrollo es más lento, pero las oscilaciones climáticas o cualquier otro fenómeno origina que su pedogénesis se acelere, se mantenga o disminuya y, en casos extremos, se detenga (Retallack, 1984).

La estimación de la duración de los procesos edafogénicos, se ha basado en la medición de ciertos indicadores de desarrollo relativo, como son los índices de Bilzi y Ciolkosz (1977), Harden (1982), Birkeland (1984b), Phillips (1990, 1993a) y Birkeland et al. (1991), cuya determinación se realiza a partir de diferentes características dinámicas del suelo. Además, existe una gran variedad de modelos matemáticos que pretende explicar la dependencia de los procesos edafogénicos con los factores formadores en función del tiempo (Jenny, 1941; Wilde, 1946; Ruhe, 1965; Runge, 1973; Jenny, 1980; Johnson y Rockwell, 1982; Johnson y Watson-Stegner, 1987: Phillips, 1990 y 1993b; Shoji et al., 1993a).

En la presente investigación se estudia el desarrollo de suelos derivados de materiales volcánicos, principalmente cenizas ácidas y básicas, que en su mayoría pertenecen al orden Andisol. Se eligieron a los Andisoles, porque en ellos se puede observar, de una manera más o menos clara, los cambios que sufren en su evolución. Asimismo, se ha considerado que el tiempo cero de formacion de dichos suelos coincide con el periodo de depósito de ceniza, ya que el intemperismo químico comienza casi inmediatamente después de que éste ocurre (Shoji et al., 1993b). De hecho se les considera como una etapa transicional entre los suelos poco desarrollados derivados de cenizas volcánicas (Entisoles) y los suelos "maduros" de los órdenes Molisol, Alfisol, Ultisol y Oxisol (Kimble y Eswaran, 1988; Van Wambeke, 1991; Shoji et al., 1990; Shoji et al., 1993a).

Objetivo

El objetivo principal de esta investigación es el desarrollo de un modelo que, a través de parámetros derivados del análisis de las propiedades físicas, químicas, morfológicas y de índices de desarrollo y alteración de los suelos de interés, permitan:

a. Establecer la etapa de desarrollo de los Andisoles,
b. Inferir la duración de los procesos edafogénicos
c. Predecir, bajo las condiciones actuales, la dirección de su evolución
d. Contar con información que pueda ser aplicable a otros suelos y paleosuelos.

Justificación
Los Andisoles representam un potencial natural, importante para la agricultura nacional, además de ser sustento de los recursos forestales de nuestro país. Sin embargo, son sistemas frágiles por naturaleza, que en su mayoría son susceptibles a la degradación, incluyendo la erosión hídrica y eólica. Por esta razón se considera necesario estudiar a fondo su génesis, velocidad de formación y directrices de evolución, que permitan formular mejores prácticas de manejo, uso y conservación. Asimismo, es indispensable determinar el tiempo que requieren para formarse y pronosticar los intergrados de evolución hacia los cuales se dirigen, bajo condiciones ambientales específicas. De esta manera, las prácticas de conservación podrán diseñarse en condiciones más acordes con la realidad.

Hipótesis
Como hipótesis de trabajo, se considera que los Andisoles son suelos en evolución continua, que los ubica como un intergrado entre diferentes unidades de suelo. El conocer su edad evolutiva permitiría determinar su velocidad de formación, su dirección de evolución y hacer predicciones sobre su comportamiento a futuro.

II. METODOLOGÍAS Y MODELOS SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LOS SUELOS

Métodos concernientes a la etapa relativa de desarrollo
Estos métodos involucran el conocimiento de la historia evolutiva del suelo, lo que involucra un análisis morfológico, físico, químico y mineralógico del perfil, así como de las características de los factores formadores (clima, organismos, material parental, relieve. Sin embargo, sumada a esta información se pueden obtener índices de formación de suelos, que involucran el desarrollo de sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas. Entre tales índices de formación destacan: (a) color del suelo; (b) índice de desarrollo relativo del perfil; (c) índice de Harden; (d) índice modificado de Harden; (e) índices mineralógicos.

Métodos relacionados con el complejo de alteración e intemperismo
El complejo de alteración de un suelo se considera como el mejor testigo de la naturaleza y grado de avance de la edafogénesis (Duchaufour, 1984). Los índices de intemperismo permiten inferir el grado de alteración, intemperismo y evolución que han alcanzado los minerales en el suelo, midiendo los relaciones molares de óxidos totales presentes en cada uno de los horizontes. Entre las relaciones más importantes están: sílice/aluminio, sílice/sesquióxidos, bases/sesquióxidos, índice de lixiviación e indice de intemperismo de Parker (Jenny, 1941; Colman, 1982).

Fechamiento directo de horizontes y perfiles.
Los métodos de fechamiento directo de los suelos son muy útiles para ciertos estudios, pero proporcionan una edad única que puede corresponder a cualquiera de las etapas de formación del suelo (la primera, la intermedia o la final). Entre los principales métodos se encuentran los siguientes: (a) método de fechamiento de los anillos de los árboles; (b) método de ^{14}C; (c) método de termoluminiscencia; (d) fechamiento U-Th de carbonatos.

Métodos experimentales.
Consisten en la reproducción de las condiciones naturales en laboratorio, con el fin de medir la velocidad de los procesos bajo condiciones de intemperismo acelerado. Destacan en el desarrollo de técnicas experimentales los trabajos de Pèdro (1964), Pèdro y Bitar (1966), Robert (1970), Lohm (1989), entre otros.

Métodos indirectos:
(a) Fósiles; (b) fitolitos; (c) posición estratigráfica; (d) cronofunciones.

Los modelos como una herramienta para estimar la evolución de los suelos
Otra herramienta para evaluar la duración de los procesos es la simulación matemática, que refleja de una manera integral los factores, procesos y condiciones que dirigen la pedogénesis, proporcionando al sistema ciertos patrones de variabilidad en el espacio y dinámica en el tiempo (Johnson y Watson-Stegner, 1987). Resulta, imprescindible el desarrollo de un modelo matemático que involucre aspectos distintivos del suelo como son sus propiedades físicas, químicas, morfológicas y mineralógicas, en términos de fácil comprensión y aplicación.

III DISEÑO METODOLÓGICO

Propiedades diagnósticas de los Andisoles.
Para la construcción del modelo se tomaron en cuenta las propiedades diagnósticas de los Andisoles: propiedades morfológicas (horizontes, estructura, color, consistencia, desarrollo relativo del perfil); propiedades físicas (densidad aparente, capcaidad de retención de humedad a 1500 kPa); propiedades químicas (pH delta, retención de fosfatos, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica, pH medido en NaF).

Índices empleados para evaluar a los factores formadores de suelo
En este trabajo se han tomado diversos índices para caracterizar a cada uno de los factores formadores, que si bien no explican al cien por ciento su influencia sobre el suelo, sí permite contar con valores que pueden ser manejados y ayudan a definir su génesis, proporcionándoles un carácter cuantitativo.

Relacionados al clima
(a) Excedente estacional de lluvia. (b) Índice de alteración mineral. (c) Índice de crecimiento vegetal. (d) Índice de agresividad climática. (e) Drenaje climático general. (f) Drenaje climático local.

Relacionados con la vegetación
(a) Índice de descomposición de la materia orgánica. (b) Índice de cobertura vegetal. (c) Degradación biológica IDB

Relacionados con el material parental y el suelo.
(a) Índice de lixiviación. (b) Índice de erodabilidad de los materiales, factor K. (c) Balances geoquímicos. (d) Índice de intemperismo de Parker. (e) Relación sílice/aluminio. (f) Relación $Fe_2O_3/(Fe_2O_3+SiO_2)$. (g) Relación sílice/sesquióxidos.

Relacionados con el relieve
(a) Pendiente. (b) Profundidad del suelo. (c) Profundidad del horizonte Cw

Métodos empleados para el muestreo y análisis de laboratorio de cada perfil.
Para elaborar el modelo que se presenta en esta investigación seleccionaron 15 perfiles edáficos, que fueron muestreados y analizados empleando técnicas similares, de acuerdo a la metodología SCS-USDA (1986).

El modelo
El modelo que se propone en esta investigación es un modelo lineal de regresión múltiple, representado por la ecuación:

$$Y=\beta_0+\beta_1X_1+...+\beta_nX_n,$$

donde β_0, $\beta_1,...,\beta_n$ son parámetros desconocidos, $X_1,...X_n$ son constantes conocidas, supuestamente medidas sin error en un experimento y Y es la variable de respuesta aleatoria.

A pesar de que ciertas propiedades estudiadas poseen un comportamiento no lineal, se ha considerado trabajar con un modelo lineal debido a:
a. Que en las etapas iniciales e intermedias, hasta llegar a la madurez, la tendencia que llevan dichas propiedades a lo largo del tiempo, son prácticamente lineales.
b. En los Andisoles, los procesos que tienen que ver con la dinámica de la materia orgánica son de los más importantes importantes y llevan un marcada tendencia lineal hasta que alcanzan su punto de equilibrio (Birkeland, 1984).
c. Cuando la tendencia lineal cambia, los Andisoles se encuentran ya en el límite hacia otros órdenes de suelos.

Procedimiento para la obtención del modelo
1. Se eligieron 15 perfiles de Andisoles de diferentes lugares de México.
2. Se calcularon los índices que se emplean en el modelo.
3. Se realizó un análisis de regresión lineal para determinar el grado de correlación que cada propiedad posee entre sí y evaluar su grado de dependencia.
4. Se hizo un análisis de regresión múltiple por cada perfil y de acuerdo a sus propiedades, obteniéndose la ecuación de regresión que caracteriza a cada perfil.
5. Se hicieron gráficas de cada propiedad para observar su comportamiento por perfil y horizonte. Se recalcularon los valores de las propiedades involucradas, de

tal manera que se le asigne a cada una un peso que facilite el manejo de los datos.
6. Se determinó la secuencia evolutiva que, teóricamente, seguían los perfiles estudiados. Se realizó una regresión lineal para determinar el grado de correlación que tiene cada característica con respecto a dicha secuencia.
7. Se seleccionaron las propiedades que resultaron más significativas y representativas para el modelo, eligiéndose las propiedades que se consideron independientes y que eran responsables del comportamiento de una propiedad de respuesta (Y).
8. Con la ecuación obtenida, se calculó el valor teórico de la variable dependiente y se colocaron en la misma gráfica dicho valor y el valor observado para cada perfil, determinando qué tanto se desvían uno del otro.
9. Se determinó el intervalo de valores que representó a cada etapa de desarrollo, asignándoles un valor paramétrico del 1 al 4.
10. A los valores de los índices relacionados con factores formadores, también se les asignó un intervalo de valores, a los que se les dio, a su vez, un valor paramétrico del 1 al 4.
11. Estos valores se incluyeron en una matriz y se realizaron gráficas que explicaron la génesis y comportamiento de cada perfil, comparando los resultados obtenidos con el modelo y los valores paramétricos asignados a los factores formadores.

IV PERFILES Y FACTORES FORMADORES

Los perfiles empleados en el modelo

El número de muestras consideradas para la construcción del modelo fue de 15 perfiles de suelo correspondientes a diferentes zonas volcánicas de México, en donde se presentan condiciones climáticas diversas, pasando por la zona templada a la subtropical y tropical. Es importante que el modelo propuesto sea válido precisamente para las condiciones climáticas mexicanas, sobre todo para las zonas tropicales, ya que los modelos que existen se han probado principalmente en zonas templadas y frías. Los perfiles de suelo se derivan de materiales volcánicos de diferentes composiciones y edades, pero básicamente trece de ellos son de edad holocénica (<10,000 años), mientras que dos proceden de materiales de 95,000 años de edad.

Catorce de los perfiles se localizan en la Faja Volcánica Transmexicana, en los estados de Jalisco, Morelos, Puebla y Veracruz, mientras que el otro pertenece a las emanaciones del volcán Chichonal en el estado de Chiapas. Cada uno de ellos posee diferencias en cuanto a los factores formadores, lo cual deriva en una evolución distinta que los ubica en diferentes etapas de desarrollo.

Cabe aclarar que a pesar de que casi todos estos perfiles poseen características ándicas, no todos cumplen con el criterio extricto de Andisoles, según Soil Taxonomy (1994).

Los perfiles
De los 14 perfiles, 5 fueron colectados por el autor de esta investigación, 2 son inéditos y proceden de los datos aportados por el Dr. Jorge Gama y el resto fueron tomados de diversos trabajos de suelos derivados de materiales volcánicos.

Perfil Chis (volcán Chichonal, Chis.)

Este es el perfil más joven de los que se analizaron, derivado de las emanaciones volcánicas básicas del volcán Chinchonal, en el estado de Chiapas, colectado tres años después de su erupción. La vegetación que se presenta es pionera y el clima que caracteriza a la zona es cálido-húmedo y el edafoclima údico, isotérmico. La clasificación propuesta corresponde con un Vitrandic Udorthent (Soil Taxonomy, 1990) o un Regosol vítrico (FAO-UNESCO, 1988). Los análisis de laboratorio indican que, no obstante su juventud, los procesos de adición y acumulación se efectúan con rapidez, de tal forma que comienza a desarrollar caracteres ándicos muy incipientes.

Perfil Tall (La Primavera, Jal.)
Este perfil se encuentra en la Sierra La Primavera, en el estado de Jalisco, en donde afloran materiales volcánicos, principalmente tobas ácidas de 95,000 años de edad (Gama et al., 1990), bajo un bosque de encino-pino que cuenta con un sotobosque arbustivo y herbáceo. El clima de la zona es templado subhúmedo con un edafoclima de tipo ústico, hipertérmico. La clasificación propuesta corresponde con un Typic Ustorthent (Soil Taxonomy, 1990) o un Regosol eútrico (FAO-UNESCO, 1988). Es un suelo muy joven, poco alterado y diferenciado que presenta una evolución muy lenta.

Perfil Tal (La Primavera Jal.)
Este perfil se encuentra en la Sierra La Primavera, en el estado de Jalisco, en donde afloran materiales volcánicos, principalmente tobas ácidas de 95,000 años de edad (Gama et al., 1990), bajo un bosque de encino-pino que cuenta con un sotobosque arbustivo y herbáceo. El clima de la zona es templado subhúmedo con un edafoclima de tipo ústico, hipertérmico. La clasificación propuesta corresponde con un Typic Eutrochrepts (Soil Taxonomy, 1990) o un Cambisol eútrico (FAO-UNESCO, 1988). Es un suelo muy joven, poco alterado y ligeramente diferenciado, a través de un horizonte A ócrico y un incipiente B cámbico.

Perfil 63 (Huitzitzilapa, Pue.)
Se localiza en la localidad de Huitzitzilapa, dentro del municipio de Tlatlauquitepec, Pue. Su material parental está compuesto una toba ácida de 7500 años de edad (Negendank, et al., 1985). En estos suelos se presentan cultivos de trigo y agricultura de temporal. El clima es templado-subhúmedo y el edafoclima es ústico, isotérmico. La clasificación propuesta corresponde con un Typic Ustivitrands (Soil Taxonomy, 1990) o un Andosol vítrico (FAO-UNESCO, 1988).

Perfil 14 (Las Margaritas, Pue.)
Localizado al NE del macizo de Teziutlán, en el municipio de Hueytamalco, Edo. de Puebla. Este perfil se deriva de materiales volcánicos andesíticos de edad holocénica. La vegetación que lo caracteriza es el pastizal inducido. El clima de la zona es cálido subhúmedo con un edafoclima de tipo údico, isotérmico. La clasificación propuesta corresponde con un Lithic Udivitrands (Soil Taxonomy, 1990) o un Andosol vítrico (FAO-UNESCO, 1988). Este suelo, debido a sus características pedológicas, puede ser considerado como representativo de la primera etapa evolutiva propuesta por Hetier (1975), en su fase más evolucionada.

Perfil 6 (Tlatlauquitepec, Pue.).
Se localiza en la localidad de Los Coles, dentro del municipio de Tlatlauquitepec, Pue. Su material parental está compuesto por piroclastos básicos de 5000 años de edad (Negendank, et al., 1985). La vegetación que caracteriza a esta zona es el pastizal inducido y el bosque de pino-encino. El clima es templado-subhúmedo y el edafoclima es údico, isotérmico. La clasificación propuesta corresponde con un Typic Udivitrand (Soil Taxonomy, 1990) o un Andosol vítrico (FAO-UNESCO, 1988). Este suelo presenta un pobre desarrollo, con un perfil poco diferenciado y de poca profundidad, que, al estar sepultando a un suelo más antiguo, comienza a tener una evolución conjunta.

Perfil SI3 (Hueytamalco, Pue.).
Se encuentra en el rancho "La Carambada", Municipio de Hueytamalco, Edo. de Puebla, derivado de piroclastos de naturaleza ácida de 7000 años (Negendank, et al., 1985). La vegetación presente en estos suelos es un bosque caducifolio. El clima es semicálido subhúmedo y el edafoclima es údico, isotérmico. La clasificación propuesta corresponde con un Typic Udivitrands (Soil Taxonomy, 1990) o un Andosol vítrico (FAO-UNESCO, 1988). Este es un perfil que ha formado un horizonte A muy profundo y bien diferenciado, con un desarrollo que va de pobre a moderado.

Perfil 110 (Tlatlauquitepec)
Se localiza en el municipio de Tlatlauquitepec, en la localidad de La Unión, Pue. Su material parental está constituido por materiales volcánicos básicos, de 5000 años de edad (Negendank, et al., 1985). La vegetación que caracteriza a esta zona es el pastizal inducido y el bosque de pino-encino. El clima es semicálido-subhúmedo y el edafoclima es údico, isotérmico. La clasificación propuesta corresponde con un Typic Fulvudand (Soil Taxonomy, 1990) o un Andosol húmico (FAO-UNESCO, 1988). Este suelo presenta un desarrollo que va de pequeño a moderado, ya que la formación de sustancias organo-minerales frena o atenúa otros procesos edafogénicos.

Perfil SI1 (Hueytamalco, Pue.)
Se encuentra en la zona cafetalera del Municipio de Hueytamalco, Edo. de Puebla, derivado de piroclastos de naturaleza ácida de 7000 años (Negendank, et al., 1985). La vegetación presente en estos suelos es un bosque caducifolio. El clima

es semicálido subhúmedo y el edafoclima es údico, isotérmico. La clasificación propuesta corresponde con un Typic Hapludand (Soil Taxonomy, 1990) o un Andosol úmbrico (FAO-UNESCO, 1988). Este es un perfil que muestra una buena diferenciación y un desarrollo moderado.

Perfil Si2 (Hueytamalco, Pue.)
Se encuentra en la zona cafetalera del Municipio de Hueytamalco, Edo. de Puebla, derivado de piroclastos de naturaleza ácida de 7000 años (Negendank, et al., 1985). La vegetación presente en estos suelos es un bosque caducifolio. El clima es semicálido subhúmedo y el edafoclima es údico, isotérmico. La clasificación propuesta corresponde con un Typic Hapludand (Soil Taxonomy, 1990) o un Andosol ócrico (FAO-UNESCO, 1988). Este perfil se encuentra bien diferenciado y muestra un desarrollo moderado.

Perfil 15 (Las Margaritas, Pue.)
Este perfil también se localiza en el municipio de Hueytamalco, Edo. de Puebla, y procede de materiales volcánicos andesíticos de edad holocénica, bajo una vegetación de pastizal inducido y una topografía ondulada. El clima de la zona es cálido subhúmedo con un edafoclima de tipo údico, isotérmico. La clasificación propuesta corresponde con un Eutric Hapludand (Soil Taxonomy, 1990) o un Andosol eútrico (FAO-UNESCO, 1988). Es un suelo con desarrollo moderado, siendo el horizonte B_2 el que mayor desarrollo ha alcanzado.

Perfil 2 (Chichinautzin, Mor.)
Este perfil se localiza en la vertiente sur de la Sierra Chichinautzin, Edo. de Morelos, en donde afloran rocas y materiales volcánicos de naturaleza básica-intermedia, con una edad estimada en 8,500 años (Solleiro, 1992) bajo una vegetación de bosque de pinos que cubre un 60% de la superficie del suelo, alternando con pastizal inducido. El clima de la zona es de tipo templado subhúmedo, con un edafoclima de tipo údico e isotérmico en sus regímenes de humedad y temperatura, respectivamente. La clasificación propuesta corresponde con un Eutric Hapludand (Soil Taxonomy, 1990) o un Andosol eútrico (FAO-UNESCO, 1988). Por sus características pedológicas, puede considerarse que este suelo ha alcanzado un buen desarrollo, ubicándose en una fase madura.

Perfil 3 (Chichinautzin, Mor.)
Este perfil se localiza en la vertiente sur de la Sierra Chichinautzin, Edo. de Morelos, cuyo material parental está compuesto de materiales volcánicos de naturaleza básica-intermedia, con una edad estimada en 8,500 años (Solleiro, 1992), bajo una vegetación de bosque de pino-encino que cubre un 60% de la superficie del suelo, alternando con pastizal inducido. El clima de la zona es de tipo templado subhúmedo, con un edafoclima de tipo údico e isotérmico en sus regímenes de humedad y temperatura, respectivamente. La clasificación propuesta corresponde con un Typic Hapludand (Soil Taxonomy, 1990) o un Andosol dístrico (FAO-UNESCO, 1988). Por sus características pedológicas,

puede considerarse que este suelo ha alcanzado un buen desarrollo, ubicándose en una fase madura.

Perfil Jal (Jalapa, Ver.)
Localizado en el Municipio de Jalapa, Edo. de Veracruz, este perfil se deriva de cenizas de composición andesítica de 5000 años de edad (Negendank et al., 1985), bajo una vegetación de bosque mesófilo de montaña. El clima es de tipo templado subhúmedo, mientras que el edafoclima es del tipo údico, isotérmico. La clasificación propuesta corresponde con un Typic Hapludand (Soil Taxonomy, 1990) o un Andosol dístrico (FAO-UNESCO, 1988). Este es un suelo que muestra un alto grado de desarrollo, constituyendo un perfil profundo y bien diferenciado.

Perfil 16 (Las Margaritas, Pue.).
Este suelo se encuentra hacia el NW de los dos anteriores, también dentro del estado de Puebla, procedente de cenizas volcánicas andesíticas de edad holocénica, bajo una vegetación de pastizal inducido. El clima de la zona es cálido subhúmedo con un edafoclima de tipo údico, isotérmico. La clasificación propuesta corresponde con un Typic Hapludand (Soil Taxonomy, 1990) o un Andosol óxico (FAO-UNESCO, 1988). Este perfil se encuentra entre los Andisoles más evolucionados, según la teoría de Hetier (1975) , con un perfil muy bien diferenciado.

Secuencia evolutiva de los suelos analizados
Los primeros suelos que caracterizan a la secuencia son suelos con características vítricas o que aún no han constituido Andisoles y se encuentran en el orden de los Entisoles, e Inceptisoles. En la siguiente etapa se consideran los suelos con características húmicas. Siguiendo la secuencia, se ha establecido a los Andisoles con propiedades dísticas y eútricas, ya que ambos procesos pueden llevarse a cabo de acuerdo con las condiciones del medio (geoforma, drenaje y microclima) y ubicarlos en el mismo estadío evolutivo. Finalmente se han considerado a los Andisoles más lixiviados, con altos porcentajes de amorfos de hierro y que, inclusive, pudieran presentar características óxicas.

Así, la secuencia teórica que se supone han seguido los suelos es la siguiente:
Chis->Tall->Tal->63->14->6->Si3->110->Si1->Si2->15->2->3->Jal-> 16
que va desde los Entisoles hasta los Andisoles más desarrollados
Vitrandic Udorthent->Typic Ustorthent->Typic Eutrochrept-> Typic Ustivitrand->Lithic Udivitrand-> Typic Udivitrand->Typic Fulvudand->Typic Hapludand->Typic Hapludand (eútricos y dístricos)->Typic Hapludand (óxicos)

Factores formadores

Las propiedades del suelo están directamente relacionadas con las características de los factores formadores: material parental (m), clima (cl), organismos (o), relieve (r) y tiempo. Cada uno de estos factores ha sido analizado de acuerdo a los datos seleccionados y representado por índices, que les confieren un carácter

cuantitativo, de tal forma que pueden ser manejados más fácilmente. La edad cronológica de los suelos ha sido estimada de acuerdo a la edad de los materiales parentales, sin embargo, ésta puede ser muy diferente a la edad evolutiva, ya que las rocas más antiguas no han producido a los suelos más viejos, sino que está en función de la conjunción de los cuatro factores antedichos y directamente relacionada con la historia genética de cada suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

V. EL MODELO

Cambio de las propiedades e índices a lo largo del perfil

El análisis de las tendencias del cambio de las propiedades e índices involucrados en el modelo, a lo largo del perfil, se realizó de modo gráfico. Las propiedades analizadas fueron: (a) Desarrollo relativo del perfil (DRP). (b) Contenido de grava, arena, limo y arcilla. (c) Estabilidad de la estructura (Est). (d) Densidad aparente (DA). (e) Retención de humedad a 1500 kPa (H_2O). (f) Materia orgánica. (g) pH delta. (h) pH medido en NaF. (i) Retención de fosfatos. (j) Capacidad de intercambio catiónico (CIC). (k) Relación sílice/aluminio (Sa) y relación sílice/sesquióxidos (Ses). (l) Relación hierro/sílice. (m) Índices bases y lixiviación. (n) Índice de Parker. (o) Balances geoquímicos

Selección de propiedades e índices

La selección de las propiedades que se utilizaron en el modelo, se realizó por medio de un análisis de regresión lineal simple entre todas las características señaladas. A partir de este análisis, se seleccionaron aquellas propiedades que arrojaron coeficientes de correlación menores que 0.75, ya que esto indicaba que las vairables eran independientes.

Secuencia de evolución teórica de los perfiles analizados y su relación con propiedades e índices

Para caracterizar mejor las propiedades elegidas y trabajar con los perfiles completos y no con cada horizonte, se realizó una ponderación de las mismas tomando un parámetro común a todas ellas: el espesor de cada horizonte del perfil, de acuerdo a la metodología establecida en el capítulo III.

De acuerdo con la secuencia evolutiva establecida, se realizó otro análisis de correlación lineal simple entre las propiedades seleccionadas y la secuencia evolutiva determinada, cuyo resultado permitió elegir a las propiedades con los valores más altos del coeficiente de correlación: desarrollo relativo del perfil (0.61), fracción acumulada limomás arcilla (0.69), capacidad de retención de humedad a 1500 kPa (0.88), retención de fosfatos (0.76), capacidad de intercambio catiónico (0.72) y relación sílice/aluminio (0.84), los cuales siguen una tendencia lineal de aumento o disminución en el contenido que presenta cada perfil, de acuerdo al orden preestablecido.

Relación entre propiedades de los suelos y factores formadores.
Por otro lado, se ha hecho un análisis del comportamiento de las propiedades e índices seleccionadas con respecto a los factores formadores, con el fin de evaluar la influencia de estos últimos en el desarrollo de suelos. Para este análisis se ha considerado la composición del material parental: materiales volcánicos ácidos y básicos; el clima, caracterizado por el índice de agresividad climática; y el tiempo, determinado por la edad del material parental.

Relación con los factores material parental y clima
En este análisis se observó que no todas las propiedades seleccionadas parecen seguir un patrón de comportamiento claro, en cuanto a los factores material parental y clima. Sin embargo, tanto la relación sílice/aluminio, como la retención de humedad y la capacidad de ontercambio catiónico están relacionadas a la composición de la roca madre y a las conciciones climáticas bajo la cual están expuestos los suelos. La fracción acumulada de limo y arcilla también se encontró relacionada con el tipo del material parental, granulometría y espesor de los depósitos, pero no con su composición.

Relación con el factor tiempo (edad de los depositos)
Se observó que la fracción acumulada limo más arcilla aumentó con la edad del depósito del material volcánico, tanto en aquéllos de composición básica como los de composición ácida, con excepción de los localizados bajo un clima templado, con un índice de agresividad climática pequeño. Por su parte, el desarrollo relativo del perfil no mostró ninguna tendencia clara de cambio con respecto a la edad de los suelos, por lo que puede decirse que dentro del área estudiada no tiene una relación significativa, y que este índice es dependiente del los otros factores formadores, sobre todo, clima y material parental.

El modelo

a. Modelos que consideran a DRP como variable de respuesta
Los modelos que consideran a DRP como variable de respuesta que se construyeron fueron dos, uno que incluyó los valores de Pret y el otro que sólo tomó en cuenta a cuatro variables X (relación sílice/aluminio, suma limo más arcilla, retención de agua y capacidad de intercambio catiónico.

Así, las ecuaciones obtenidas son:
$Y= 2.01X_1 + 0.07\ X_2 + 0.12\ X_3 + 0.27\ X_4 + 0.07\ X_5 - 11.71$ (1)
$Y= 0.81X_1 + 0.03X_2 - 0.14\ X_3 + 0.29X_4 - 2.42$ (2)
donde X_1 = Sa; X_2=lim+arc; $X_3 = H_2O$; X_4 =CIC; X_5 =Pret
(1) ecuación de regresión considerando Pret
(2) ecuación de regresión sin considerar Pret

De estas dos ecuaciones, la que arrojó un valor más alto de R^2 es la que considera a la retención de fosfatos, de tal forma que se concluye que esta propiedad sí influye en el desarrollo relativo del perfil. Los valores tan altos de

error estándar se deben a que el número de datos con el que se trabajó es pequeño, pero pueden ser optimizados al considerar a un mayor número de perfiles.

b. Modelos que consideran a la fracción acumulada limo más arcilla como variable de respuesta

De acuerdo a los resultados obtenidos con las ecuaciones anteriores, se realizó otra regresión lineal múltiple, tomando como variable de respuesta Y, a la suma limo más arcilla, obteniéndose cuatro ecuaciones: (3) la que consideró a todas las variables; (4) la que eliminó a Pret; (5) la que eliminó a DRP; (6) la que eliminó tanto a Pret como a DRP.

Las ecuaciones obtenidas son:

$Y = -3.96 X_1 + 0.28 X_2 + 0.57 X_3 - 0.09 X_4 + 0.33 X_5 + 40.89$ (3)

$Y = -2.69 X_1 + 0.29 X_2 + 0.56 X_3 + 0.24 X_4 + 31.94$ (4)

$Y = -3.48 X_1 + 0.32 X_2 + 0.65 X_3 - 0.06 X_4 + 38.43$ (5)

$Y = -2.67 X_1 + 0.32 X_2 + 0.63 X_3 - 32.50$ (6)

donde X_1 = Sa; $X_2 = H_2O$; X_3 =CIC; X_4 =Pret; X_5 DRP para la ecuación (3): X_4 =DRP para la ecuación (4); X_4 =Pret para la ecuación (5)

(3) ecuación de regresión considerando Pret y DRP

(4) ecuación de regresión sin considerar Pret

(5) ecuación de regresión sin considerar DRP

(6) ecuación de regresión sin considerar DRP ni Pret.

Las 4 ecuaciones anteriores arrojaron valores similares de R^2 (0.75) y al igual que con las ecuaciones donde Y=DRP, los valores tan altos de error estándar obtenidos se deben a que el número de datos es pequeño.

Se concluyó que el modelo de regresión lineal que mejor caracteriza la secuencia evolutiva de los Andisoles es el que proporciona la ecuación (5):

Con toda la información obtenida y ordenada se proponen cuatro etapas de evolución para el orden Andisol, en contradicción a las que presenta Hetier (1975) quien establece tres etapas de desarrollo para los suelos derivados de materiales volcánicos, las cuales corresponden con una alteración geoquímica y diagenética en la etapa I, una alteración bioclimática e incorporación de la materia orgánica en la etapa II y con el envejecimiento de geles mixtos en la tercera etapa, las cuales no reflejan el comportamiento total que siguen los suelos a lo largo de su evolución. Las etapas propuestas para este estudio son:

Etapa I. Etapa temprana de alteración de materiales volcánicos. Transición de Entisoles a Andiosles (diferenciación de unos y otros por el criterio del oxalato ácido Al+1/2Fe≥0.4% y la retención de fosfatos >25% (Soil Survey Staff, 1990, 1992).

Etapa II. Incorporación de la materia orgánica, incrementándose el desarrollo del horizonte A. Comienza la diferenciación de un horizonte Bw.

Etapa III. Incorporación de mayores cantidades de alofano e imogolita en el horizonte Bw (cámbico), con propiedades ándicas bien definidas a través del criterio del oxalato ácido Al+1/2Fe≥2.0%, la retención de fosfatos >85% y la densidad aparente ≤0.9 g/cm^3 (Soil Survey Staff, 1990, 1992).
Etapa IV. Etapa más avanzada de la andosolización, que marca la transición de los Andisoles hacia suelos correspondientes a otros órdenes Inceptisoles, Esposososoles, Mollisoles, Alfisoles, Ultisoles, e inclusive Oxisoles, dependiendo de las condiciones locales de los factores formadores.

Factores formadores y las etapas de desarrollo
Por otro lado, se han evaluado los valores de los índices calculados para los factores formadores y su influencia en el desarrollo del suelo, expuestos en el capítulo IV y que corresponden a cada término de la matriz de Phillips (1993b). A tales índices se les ha denominado como universales, ya que pueden ser aplicados a todos los órdenes de suelo. Al igual que el modelo de regresión lineal ha arrojado cuatro etapas de desarrollo para los suelos, con los valores de los índices se proponen también cuatro etapas evolutivas, a cada una de las cuales les corresponde un intervalo, obtenido a través de la caracterización de los perfiles. Asimismo, se les ha asignado un valor paramétrico, del 1 al 4, para contar con datos de más fácil correlación.

Tendencias evolutivas de los perfiles
En resumen, la velocidad de formación de los suelos estudiados se ilustra de la siguiente forma.

Los perfiles de Tala (Tal y Tall) son suelos que van a alcanzar su máxima evolución en un tiempo muy largo y, quizá, nunca lleguen a constituirse como Andisoles.

El Typic Ustivitrand (perfil 63), muestra una velocidad de pedogénesis lenta que lo lleva al desarrollo de suelos con propiedades mólicas, dentro de los grandes grupos de Andic Haplustolls. Por su parte, el Typic Fulvudand (perfil 110), a pesar de mostrar un desarrollo moderado, y presentar factores formadores que podrían acelerar los procesos, se considera que su evolución será lenta por la alta estabilidad que poseen sus componentes.

Los suelos Eutric Hapludand (perfil 2) y Typic Hapludand (perfil 3) tienen una velocidad de formación moderada, encontrándose en el mismo estadío de desarrollo, pero cuya dirección evolutiva divergente, ya que mientras el perfil 2 muestra una marcada tendencia a la eutrificación, el perfil 3 posee características dístricas. Así, como se ha señalado que el perfil 2 es un intergrado hacia un Andic Hapludalf, mientras que el 3 puede derivar en un Typic Hapludult.

Los suelos Vitrandic Udorthent (Chis), Luthic Udivitrand (14), Typic Udivitrand (Si3), Typic Hapludand (Si1, Si2, Jal, y 16) y Eutric Hapludand (15), a pesar de

pertenecer a diferentes etapas de desarrollo, se espera alcancen su máxima evolución en poco tiempo, favorecida, principalmente por el clima, acelerándose o atenuándose los procesos dependiendo de las condiciones de estación locales (relieve y material parental). De estos perfiles, el más joven es el correspondiente a Chis, el cual, sin embargo, está siendo afectado, más agresivamente, por los factores formadores, de tal suerte que puede llegar a constituir un Andisol en muy poco tiempo.

VI. CONCLUSIONES

1. De las propiedades analizadas para representar a las variables en el modelo, las que mejor reflejan el desarrollo de los suelos son: la relación sílice/aluminio, la capacidad de retención de humedad a 1500 kPa, la retención de fosfatos y la capacidad de intercambio catiónico, las cuales arrojaron valores del coeficiente de correlación mayores que 0.75, en relación con la secuencia evolutiva establecida para los suelos.
2. De todas las características representadas en el modelo, la relación sílice/aluminio (Sa) influye negativamente en un 77.16; la capacidad de retención de humedad influye en un 7.10%; la capacidad de intercambio catiónico influye en un 14.41%; y la retención de fosfatos influye negativamente en 1.33%.
3. Se establecen cuatro etapas de desarrollo de los Andisoles, de acuerdo con el contenido estimado de limo + arcilla, los cuales corresponden con: desarrollo escaso, moderado, fuerte y muy fuerte.
4. Por medio de los índices calculados para los factores formadores, se proponen también cuatro etapas evolutivas. Asimismo, se les ha asignado un valor paramétrico, del 1 al 4, para contar con datos de más fácil correlación. Algunos índices analizados no proporcionaron información valiosa, como es el caso del índice de degradación biológica, asociado a la degradación de la materia orgánica, el tipo de vegetación por área de cobertura, la densidad de cobertura vegetal y el factor K de erodabilidad, los cuales no muestran un patrón definido en cuanto al desarrollo del suelo.
5. Sin embargo, los índices de alteración y aquéllos relacionados con el clima resultaron de gran utilidad, porque claramente se observa que es posible establecer los intervalos de valores directamente asociados a las etapas de desarrollo.
6. Los suelos estudiados se encuentran en las siguientes etapas de desarrollo:
   Los suelos de los perfiles de Tala (Tal y Tall) son suelos que están en la etapa I y van a alcanzar su máxima evolución en un tiempo muy largo. El perfil Chis (Vitrandic Udorthent), está en la etapa I, pero se considera que pronto se ubicará en otro estadio evolutivo, ya que su velocidad de pedogénesis es muy rápida. El perfil 63 (Typic Ustivitrand), está también en la etapa I y muestra una velocidad de pedogénesis lenta que lo lleva al desarrollo de suelos con propiedades mólicas, dentro de los grandes grupos de Andic Haplustolls. El perfil 110 (Typic Fulvudand) está en la etapa II y se considera que su evolución es lenta por la alta estabilidad que poseen sus componentes organo-minerales. Los perfiles Si1 (Typic Hapludand), Si2 (Typic Hapludand), Si3 (Typic

Udivitrand), 6 (Typic Udivitrand) se encuentran en la etapa II, y se espera que su evolución sea rápida. Los perfiles 2 (Eutric Hapludand y 3 (Typic Hapludand) poseen una velocidad de formación moderada, que se encuentran en el mismo estadío de desarrollo (etapa III), pero cuya dirección evolutiva es diferente, ya que mientras el perfil 2 muestra una marcada tendencia a la eutrificación, el perfil 3 posee características dístricas. Así, el perfil 2 es un intergrado hacia un Andic Hapludalf, mientras que el 3 puede derivar en un Typic Hapludult. Los perfiles Jal (Typic Hapludand, etapa III), 14 (Lithic Udivitrand, etapa II), 15 (Typic Hapludand) y 16 (Typic Hapludand, etapa IV), a pesar de pertenecer a diferentes etapas de desarrollo, se espera alcancen su punto máximo en poco tiempo, favorecida, principalmente por el clima (subtropical), acelerándose o atenuándose los procesos dependiendo de las condiciones de estación locales (relieve y material parental).

11. Es posible observar que la edad de los depósitos es independiente de la evolución que muestran los perfiles, ya que los más antiguos (Tal y Tall) son los que poseen menor desarrollo. Es por eso que para fines genéticos es más útil contar con la edad evolutiva, que tener datos sobre edades absolutas que nada tienen que ver con el verdadero desarrollo de los suelos.
12. Por otro lado, si se ve claramente que los perfiles derivados de materiales ácidos muestran una evolución más lenta que, si se conjuga con un clima de poca alterabilidad, da como resultado una velocidad de pedogénesis bastante lenta.