

PROCESOS ESPECÍFICOS DE FORMACIÓN EN ANDISOLES, ALFISOLES Y ULTISOLES EN COLOMBIA

✉ JORGE ALBERTO SÁNCHEZ ESPINOSA¹
YOLANDA RUBIANO SANABRIA²

RESUMEN

En el presente artículo se revisan las principales relaciones entre la génesis y la mineralogía de Andisoles, Alfisoles y Ultisoles en Colombia, con el fin de entender su evolución y clasificación y proponer alternativas técnicas para la utilización y el manejo sostenible de este importante recurso de suelos en Colombia. De igual manera, se analizó la relación entre la mineralogía de estos suelos y su fertilidad, de acuerdo con las especies presentes en sus fracciones gruesa (arena y limo) y fina (arcilla); teniendo en cuenta que la fracción gruesa constituye una reserva potencial de nutrientes, en tanto que la arcillosa determina el comportamiento físico-químico del suelo (Mejía 1980). El artículo es producto de la respuesta al examen escrito de candidatura, presentado por el autor en el marco de sus estudios doctorales. Para ello se hizo una revisión bibliográfica del estado del arte sobre el conocimiento de la génesis y evolución de estos Órdenes de suelos en el país.

PALABRAS CLAVE: génesis y mineralogía de suelos; fracción arcillosa; fracción arenosa.

PROCESS SPECIFIC TRAINING ANDISOLS, ALFISOLS AND ULTISOLS IN COLOMBIA

ABSTRACT

The aim of this paper is to review in very general and fast key relationships between soil genesis, mineralogy, fertility and behavior, to achieve this, it is a quick review of key concepts compiled as a result of the consultation articles and books mainly from some Colombian authors with extensive experience in this field. To understand the mineralogy of the soil fractions and its relationship with fertility, it is necessary to note that the soil mineral fraction is composed of the coarse fraction (sand and silt) and fine fraction (clay). The coarse fraction is a potential reservoir of nutrients and the clay fraction determines the physicochemical behavior of the soil, given by its activity (Mejia 1980).

KEYWORDS: Genesis and Mineralogy of oSils; Clay Fraction; Sand Fraction; Current and Potential Fertility.

-
- ¹ Antropólogo, Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá. Agrólogo, Universidad Jorge Tadeo Lozano. Especialista en Interpretación de Imágenes de Sensores Remotos APL, Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). MSc en Ciencias Agrarias, área Suelos, Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá. PhD. (c) en Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, Coordinador Nacional Laboratorio de Suelos, Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), y docente Universidad Santo Tomás-VUAD.
- ² Agróloga, Universidad Jorge Tadeo Lozano. Especialista en Interpretación de Imágenes de Sensores Remotos API, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. PhD. en Ciencias Agrarias, Área Suelos y Agua, Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. Profesora Asociada Facultad de Agronomía, investigadora grupo Desarrollo Sostenible y Gestión Ambiental, Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá.

✉ *Autor de correspondencia:* Sánchez-Espinosa, J.A. (Jorge Alberto). Carrera 30 N. 48-51, Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá, Colombia Tel: (571) 369 40 16 / Correo electrónico: jasanchez@igac.gov.co

Historia del artículo:
Artículo recibido: 25-XI-2013 / Aprobado: 29-IX-2014
Disponible online: 30 de octubre de 2014
Discusión abierta hasta diciembre de 2016

PROCESSOS ESPECÍFICOS DE FORMAÇÃO EM ANDOSSOLOS, ALFISSOLOS E ULTISSOLOS NA COLÔMBIA

RESUMO

Neste artigo vamos a analisar as principais relações entre o gênese e mineralogia de Andossolos, Alfissolos e Ultissolos na Colômbia, a fim de compreender a sua evolução e classificação e propor alternativas técnicas para a utilização e gestão sustentável deste importante recurso dos solos na Colômbia. Da mesma forma, foi analisada a relação entre a mineralogia desses solos e da sua fertilidade, De acordo com as espécies presentes em suas frações grossas (areia e limo) e finas (argila); considerando que a fração grossa constitui uma reserva potencial de nutrientes, enquanto que a argila determina o comportamento físico-químico do solo (Mejia 1980). O artigo é o resultado da resposta a um exame escrito apresentado pelo autor como parte dos seus estudos PhD. Por isso foi feita uma revisão da bibliografia sobre o estado e da Arte sobre o conhecimento da gênese e evolução dessas ordens dos solos no país.

PALAVRAS-CHAVE: Gênese e mineralogia de solos; Fração argila; Fração areia.

1. INTRODUCCIÓN

El análisis e interpretación de los factores y procesos formadores del suelo es clave para dilucidar su génesis (origen y evolución) y también para identificar los cambios y procesos que han ocurrido durante su evolución hasta alcanzar el estado estable; esto permite evaluar la estabilidad relativa del suelo y establecer las pautas más convenientes y racionales para su uso y manejo dentro de posibles estrategias de protección del ecosistema. Los procesos específicos de formación de Andisoles, Alfisoles y Ultisoles son la andolización en el primero y la iluviación en los otros dos.

El trabajo se ha documentado con la información obtenida en los estudios de suelos llevados a cabo en Colombia, principalmente por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi. El objetivo del presente artículo es revisar las relaciones entre la génesis y la mineralogía de andisoles, alfisoles y ultisoles en Colombia, con el fin de entender su evolución, establecer su clasificación y proponer técnicas de utilización y manejo sostenibles. Para lograr el objetivo se hace una revisión y consulta bibliográfica del estado del arte sobre el conocimiento de la génesis y evolución de estos Órdenes de suelos en el país. El material utilizado para la documentación y análisis hace parte de la temática con la que el autor dio respuesta al examen de candidatura doctoral y específicamente a las preguntas formuladas por el Profesor Pierre Faivre, PhD, científico de suelos con amplia experiencia en el conocimiento de los suelos de Colombia.

2. ANDISOLES

2.1. Distribución geográfica

Los Andisoles cubren más de 124 millones de hectáreas, aproximadamente el 0,84 % de la superficie de la tierra (Tsai, *et al.*, 2010). El sorprendente patrón de la distribución de los Andisoles sigue paralelo al Círculo de Fuego del Pacífico, que concentra las zonas de actividad tectónica y volcánica a lo largo de la costa occidental de todo el continente americano, se extiende a través de las Islas Aleutianas, hacia el sur de la Península de Kamchatka en Rusia, de un lado a otro de Japón, Filipinas e Indonesia, a través de Papúa Nueva Guinea, Islas Salomón y Vanuatu y otras Islas del Pacífico hasta Nueva Zelanda (Soil Survey Staff 1999). Aproximadamente el 60 % de los andisoles se encuentra en países tropicales.

A pesar de que los Andisoles totalizan una extensión relativamente pequeña de la superficie del mundo, representan un recurso crucial y valioso de suelos agrícolas en relación con las altas concentraciones de población que vive en estas regiones (Takahashi, *et al.*, 2002).

En Colombia estos suelos se encuentran distribuidos en la región Andina y cubren alrededor del 4,5 % (cerca de 5.200.000 hectáreas) del territorio nacional, con predominio en la cordillera Central, algo menos en la Occidental y con menor extensión en la Oriental. Su distribución abarca paisajes de montaña, siendo más extensos en las altiplanicies,

piedemontes, planicies aluviales y esporádicamente áreas fluvio marinas (Ávila 2005).

2.2. Génesis

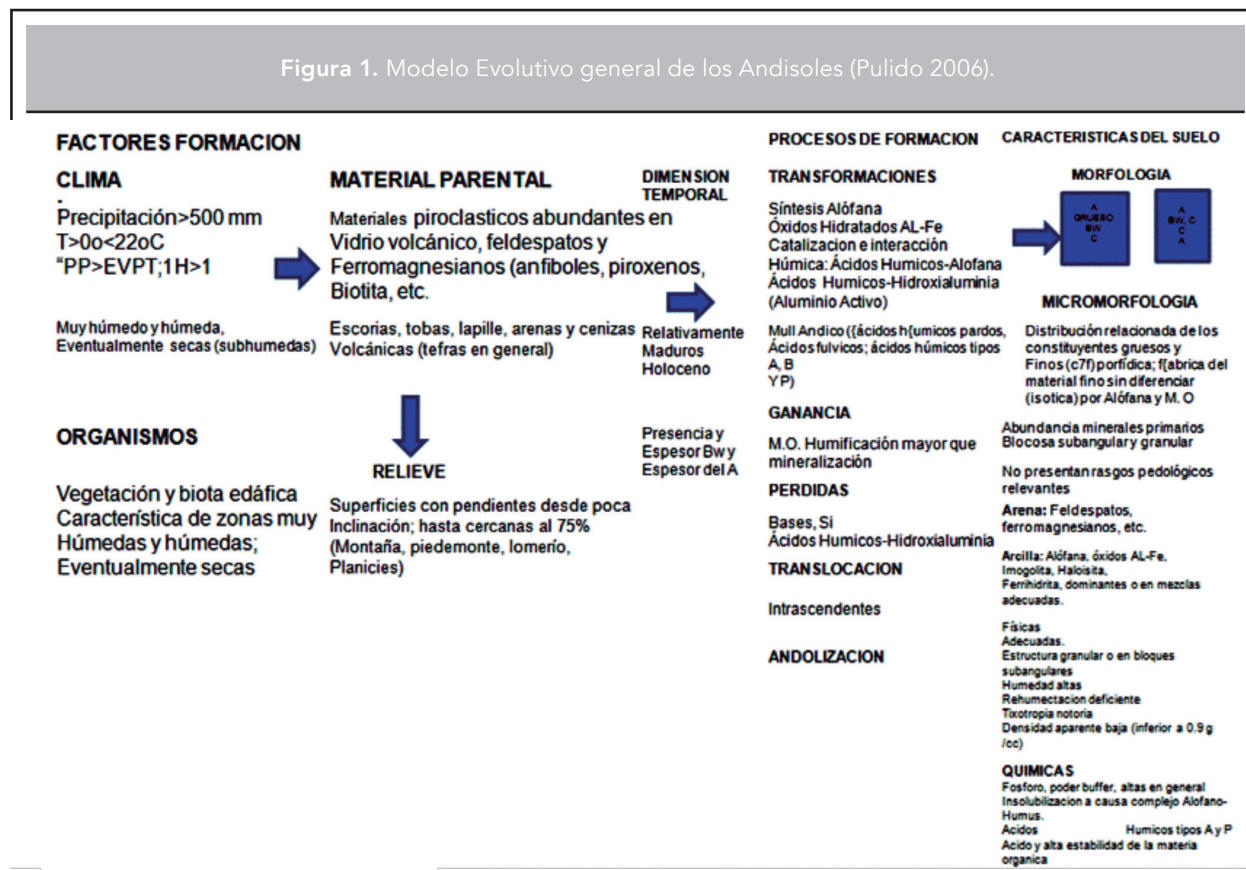
Al hablar de pedogénesis relacionada con las propiedades ándicas hemos de referirnos a los suelos derivados de ceniza volcánica, presentes en áreas bajo la influencia o con presencia de volcanes activos o recientemente extintos. Estos suelos se caracterizan por poseer propiedades únicas que los definen muy bien y contribuyen significativamente a la producción agropecuaria y forestal (Takahashi, *et al.*, 2002). Sus propiedades se adscriben principalmente a cantidades abundantes de materiales no cristalinos o de baja cristalinidad, denominados amorfos, entre los cuales se encuentran alófana, imogolita, complejos al-humus, ferrihidrita y otros similares (Nanzyo 2002). Los suelos de ceniza volcánica o Andisoles presentan también propiedades químicas y mineralógicas particulares; las primeras se deben básicamente a su composición elemental

rica en aluminio, a una reactividad natural muy alta en su fracción coloidal y a su elevada área superficial. La composición elemental rica en aluminio es producto del lavado de silicio, sodio, calcio y otros cationes durante la formación del suelo (Pulido 2006).

Los suelos derivados de ceniza volcánica tienen rasgos morfológicos, físicos y propiedades químicas que raramente se encuentran en suelos derivados de otros materiales (Nanzyo 2003); estas propiedades distintivas son propiciadas en gran parte, a la formación de materiales amorfos y a la acumulación de carbono orgánico, que son los dos procesos pedogenéticos dominantes en suelos derivados de cenizas volcánicas (Shoji, *et al.*, 2002).

La génesis de los materiales amorfos es muy afectada por el clima, especialmente el régimen de lixiviación, y por el tiempo de exposición a la intemperie (Dahlgren, *et al.*, 2005). Varios estudios de suelos realizados a lo largo de secuencias climáticas (climosecuencias) han mejorado la comprensión del efecto climático en la formación de los materiales amorfos (lo cual llevan en el tiempo a la aparición

Figura 1. Modelo Evolutivo general de los Andisoles (Pulido 2006).



de las reconocidas «propiedades ándicas» de los suelos), en términos generales han encontrado que la presencia de materiales amorfos ocurre preferentemente en áreas con alta lixiviación (Zehetner, *et al.*, 2006).

De acuerdo con Duchaufour (1984) los Andisoles constituyen para los investigadores de suelos un material de estudio de considerable interés, ya que representan un verdadero laboratorio natural donde la interacción de los amorfos orgánicos y amorfos minerales alcanza una amplitud excepcional que permite seguir más fácilmente la evolución de esos dos constituyentes.

En la **Figura 1** se presenta el modelo evolutivo general de los Andisoles en Colombia, el que sintetiza la génesis y las propiedades relevantes del proceso de andolización. En su formación y desarrollo los factores formadores material parental y clima y los procesos de formación transformaciones y pérdidas tienen una importancia capital, porque son los que regulan el proceso específico de andolización (Duchaufour 1984; Besoain 1985; Malagón, *et al.*, 1991; Soil Survey Staff 1999; Takahashi, *et al.*, 2002; Nanzyo 2002; Dahlgren, *et al.*, 2004); también señalan estos autores que las propiedades de los Andisoles están regidas en buena parte por los materiales inorgánicos amorfos y orgánicos y sus íntimas interacciones que se generan durante la pedogénesis.

La génesis de los Andisoles ocurre en general de tres etapas principales (Duchaufour 1984):

1. PRIMERA ETAPA: alteración pre-edafológica. Se trata de la primera alteración de los piroclastos en general, que tiene lugar antes de la colonización por la vegetación y de la incorporación de la materia orgánica. En esta etapa los vidrios se hidratan y se originan bolas esféricas amorfas que evolucionan por cristalización progresiva, dando arcillas tipo montmorillonita neoformadas en un medio generalmente rico en sílice y cationes alcalinotérreos. Posteriormente bases y sílice son eliminadas rápidamente, el medio se acidifica y aparecen arcillas más pobres en sílice, imogolita y haloisita, en la secuencia: alófana-imogolita-haloisita.

2. SEGUNDA ETAPA: acción de la materia orgánica. Dada por la incorporación al suelo de cantidades importantes de sustancias hidrosolubles de la hojarasca; esta es la fase de edafogénesis durante la cual la alteración se acelera y toma el carácter de una acidólisis. En esta etapa los componentes húmicos preservan la condición amorfa de

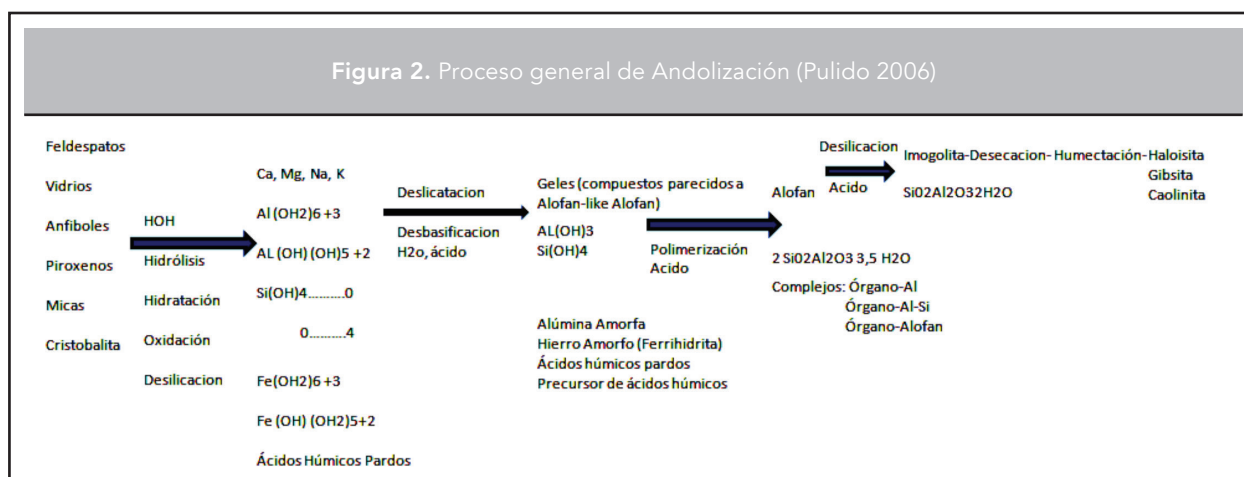
los geles minerales impidiendo la neoformación de arcillas cristalinas, y, aunque los hidróxidos de hierro y aluminio están inmovilizados, no ocurre lo mismo con la sílice y las bases, las cuales son eliminadas progresivamente en estado soluble; incluso parece probable que la incorporación de materia orgánica acelere la eliminación de la sílice soluble. En contrapartida, los compuestos minerales amorfos ejercen a su vez, principalmente a través de la alúmina, un efecto importante sobre la evolución de la materia orgánica. Estos compuestos mantienen una humedad constante y, por lo tanto, aceleran la descomposición de la materia orgánica fresca, pero a su vez estabilizan y protegen los compuestos humificados contra la biodegradación microbiana, de tal forma que estos se acumulan en cantidad considerable en el perfil de suelo.

3. TERCERA ETAPA: evolución por envejecimiento de los geles mixtos. Una doble poli condensación afecta de una parte a la fracción orgánica y de otra a la fracción mineral de los complejos; se trata de la evolución normal de los complejos órgano-minerales, relacionada con las alternancias estacionales de humectación y desecación, en la que los aniones complejantes evolucionan por poli condensación formando moléculas cada vez más voluminosas. Así, en los Andisoles, los complejos más viejos, presentes en el centro de los agregados órgano-minerales están formados por ácidos húmicos, mientras que los complejos recientes, en posición periférica, son ácidos fulvicos más jóvenes y poco condensados. Los cationes complejados se transforman polimerizándose y perdiendo sus cargas poco a poco, así: complejos verdaderos complejos de adsorción - formas libres ($Al+3 Al(OH)_2 \rightarrow Al(OH)_2 \rightarrow Al(OH)_3$).

En conclusión, el proceso de andolización depende estrechamente del edafoclima; cuando el suelo no se deseca nunca, la tercera etapa de la evolución apenas se produce y los procesos de neo formación de las arcillas y de mineralización de los componentes orgánicos más evolucionados son muy lentos al máximo y el suelo se mantiene como un Andisol (Pulido 2006).

En la **Figura 2** se sintetiza el proceso específico de andolización considerado motor en la pedogénesis y propiedades de los Andisoles.

Respecto a este proceso específico típico de los Andisoles, Besoain (1985) indica que la andolización es un proceso específico y continuo; específico porque difícilmente se produce en otros materiales parentales



aparte de los materiales piroclásticos, ya que se requiere la existencia de componentes vítreos lábiles muy reactivos con elevada superficie específica por unidad de volumen, condición que se presenta solo en piroclásticos. El proceso es continuo y se produce término a término, y los productos señalan niveles de estabilidad, es decir, predominio de una especie en tiempos y ambientes determinados, sin que la transición se detenga, de modo que una serie de efectos intermedios debe producirse. Todos los términos de la secuencia de meteorización son metaestables y se hacen más estables a medida que el proceso avanza en el orden: protoalofan-alofan-haloisita-metahaloisita-caolinita desordenada (Pulido 2006).

De lo anterior se concluye que la formación de los Andisoles es favorecida por todos los factores que aceleran la alteración de los minerales y el vidrio volcánico y permiten la síntesis rápida de los aluminosilicatos amorfos. Se destaca también en este evento pedogenético, la naturaleza del material parental piroclástico y un clima constantemente húmedo, requisitos óptimos para su desarrollo; por lo tanto el proceso de andolización se ve favorecido en áreas donde la precipitación excede a la evapotranspiración y la temperatura no sea mayor a 25°C (Besoain 1985).

Se destaca también en la formación de los Andisoles la naturaleza del material parental. El material parental básico en la formación de estos suelos son los productos de las deyecciones volcánicas; estas deyecciones pueden arrojar materiales tan gruesos como las escorias o tan finos como las cenizas, y en cuanto a su naturaleza, materiales piroclásticos desde basálticos hasta riolíticos. Los materiales piroclásticos, y en especial las cenizas volcánicas, están

subordinados a los principios generales de meteorización, pero comparados con otros materiales parentales manifiestan cambios específicos cuando la alteración procede sobre cierto nivel de humedad mínima, por ejemplo 700 mm en Chile o 500 mm para las áreas de páramo nubladas (Besoain 1985).

En lo que respecta al relieve como factor de formación, tiene poca incidencia en la pedogénesis de los Andisoles; no obstante, cuando los materiales piroclásticos se depositan tienden a suavizar la topografía, es decir, disminuye la inclinación de las pendientes, especialmente en el paisaje montañoso. Solamente cerca de la fuente eruptiva se originan formas propias como lahares, coladas y campos de escorias y los suelos se desarrollan en pendientes que varían desde planas hasta fuertemente inclinadas o quebradas (Pulido 2006).

2.3. Propiedades

Duchaufour (1984) indica que si bien la génesis de los Andisoles es complicada, sus características bioquímicas son relativamente constantes y homogéneas, al menos en los tipo «modales», excepto en los suelos poco evolucionados (vitrosiles) así como en las numerosas formas de «integrados», en las cuales se suman a las características propiamente ándicas otras que los hace emparentar con diversas clases de suelos.

De igual manera Dahlgren, *et al.* (2004), resaltan que los Andisoles típicos tienen su fracción coloidal dominada por complejos alúmina-humus o alófana / imogolita,

en ambientes de alteración húmedos, y en contraste haloisita, con frecuencia dominante, en climas con un definido periodo seco, o en capas de suelos enterrados con drenaje imperfecto. Los autores mencionados indican que, bajo condiciones de alteración húmedas, la composición de la fracción coloidal forma un continuo entre complejos puros aluminio-humus y pura alófana/imogolita, que dependen del pH y de la materia orgánica característica del medio ambiente de alteración; sugieren además que los andisoles se dividen con frecuencia en dos grupos con base en su composición mineralógica: andisoles alofánicos dominados por alófana e imogolita y andisoles no alofánicos dominados por complejos aluminio-humus y filosilicatos 2:1.

Respecto a la evolución de la materia orgánica Dahlgren, *et al.* (2004) indican que el complejo alumina-humus se origina en medios pedogenéticos ricos en materia orgánica y con valores de pH de 5 o menos, rango en que los ácidos orgánicos son predominantes donadores de protones (H⁺), disminuyendo el pH y el aluminio activo soluble. Bajo estas condiciones, el humus compite eficientemente por el aluminio disuelto, dejando poco del catión disponible para su coprecipitación con sílice y formar materiales aluminosilicatados. Destacan los mismos autores que alófana e imogolita se forman preferencialmente en medioambientes de alteración con valores de pH entre 5 y 7 y con bajo contenido de complejantes orgánicos; en estas condiciones mientras la ferrihidrita es el oxihidróxido de hierro encontrado comúnmente en andisoles ya que, por su alta estabilidad en la forma oxihidroxido frente al complejo húmico, el elemento genera una cantidad baja de complejo Fe-humus.

La presencia de materiales no cristalinos y humus en los andisoles genera propiedades químicas y físicas particulares como: predominio de carga variable, alta capacidad de retención de agua, alta retención de fosfatos, baja densidad aparente, alta friabilidad y formación de agregados de suelo estables (Dahlgren, *et al.*, 2004).

Duchaufour (1984) y Malagón, *et al.* (1991) sintetizan las propiedades de los andisoles modales así:

1. MORFOLÓGICAS: en los tipos de Andisoles no diferenciados, el suelo, uniformemente oscuro o negro, tiene la apariencia de un perfil AC cuyo horizonte A se caracteriza por una fuerte acumulación de amorfos orgánicos y minerales y está fuertemente humificado; a menudo se forma un

horizonte B oscuro o pardo amarillento en el límite entre la zona alterada, constantemente húmeda y la zona poco alterada con frecuencia más seca, principalmente sobre cenizas, ver **Figura 3**, donde se muestra la morfología de un perfil de un andisol en Pasca Cundinamarca.

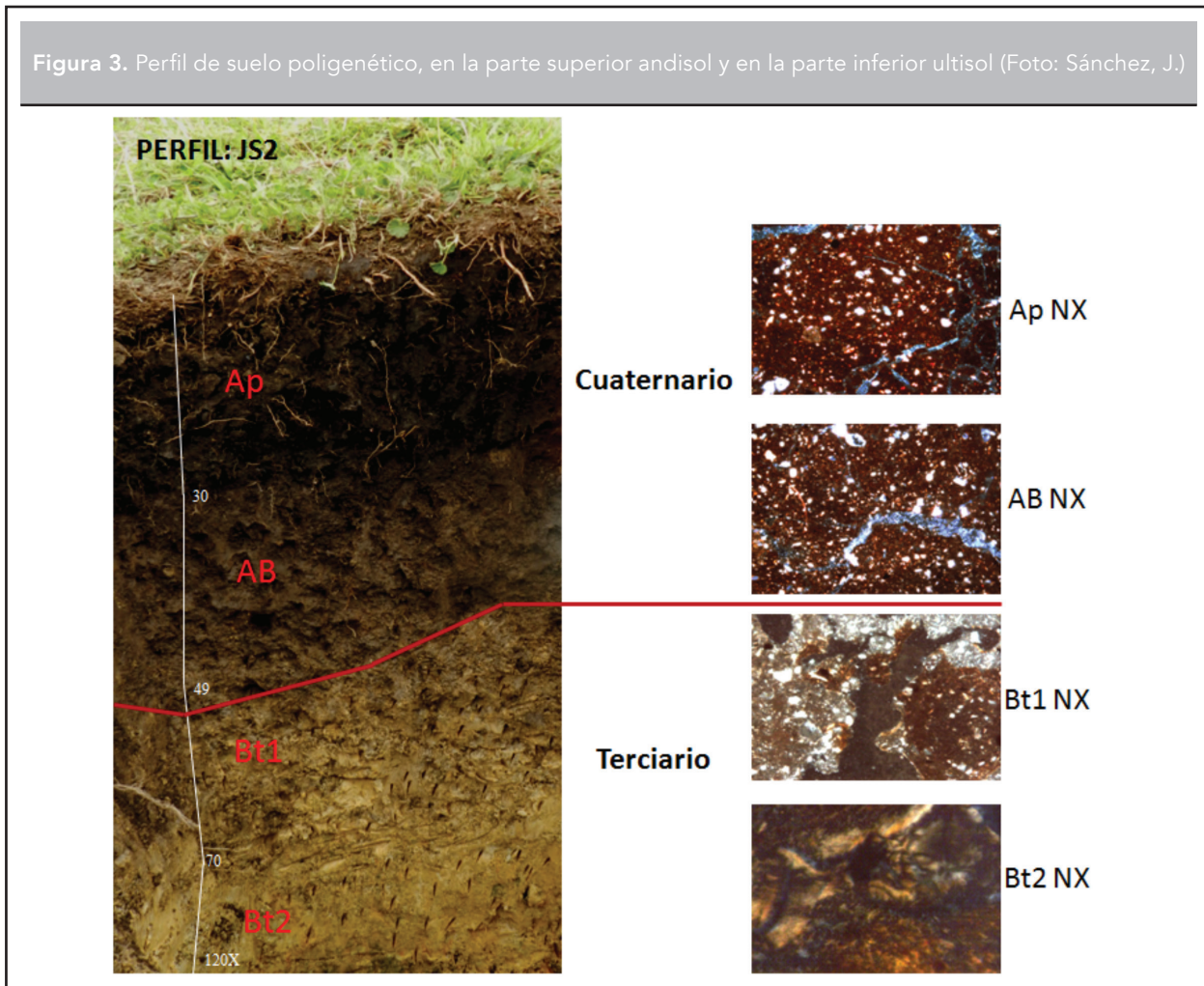
2. FÍSICAS: densidad aparente inferior a 0,8 g/cc, permeabilidad y porosidad muy elevadas y estructura característica de ensamblaje de microagregados estables que generan grumos, gránulos o bloques subangulares muy finos con una consistencia particular tixotrópica, pegajosa y untuosa al tacto en estado húmedo y pulverulenta en seco. Las arenas son minoritarias y tiene una enorme capacidad de retención de humedad tanto a capacidad de campo como en el punto de marchitamiento.

La experiencia ha mostrado que en estos suelos la desecación prolongada puede rebajar notoriamente y de modo irreversible la capacidad de campo (valores del 100 % pueden descender a menos del 50 %). De otra parte, dado que estos suelos son difíciles dispersar en el laboratorio, su análisis granulométrico no es fácil de realizar y de interpretar, por lo cual hay que acudir a la prueba organoléptica de campo para determinar con mayor certeza la clase textural.

3. QUÍMICAS: los materiales amorfos inorgánicos y orgánicos suministran a los andisoles propiedades químicas muy particulares; entre las químicas se destaca su alta capacidad de cambio catiónico y aniónico (en función del pH del medio) alto poder *buffer* como consecuencia de ello, y especialmente del elevado valor de las cargas dependientes del pH; alta retención de fósforo; contenidos de aluminio e hierro activos altos; escaso contenido de bases y, por ende, baja saturación de estas, principalmente cuando se cuantifican con la capacidad de cambio catiónico valorada a pH 7,0, (cuando se valoran con la CIC a pH del suelo se incrementa el valor debido a que la CIC puede quedar reducida a la mitad). La acidez desde muy fuertemente ácido en los horizontes superficiales (pH: 5,1-5,5) a moderadamente ácidos en los profundos (pH: 6,1-6,5).

En cuanto a los elementos mayores (N, P, K) y los micronutrientes (Mn, Zn, Cu, Fe, B entre otros) necesarios para la biosíntesis de los compuestos orgánicos y esenciales para la nutrición vegetal, puede comentarse lo siguiente: el nitrógeno, por ejemplo, en los andisoles altos en materia

Figura 3. Perfil de suelo poligenético, en la parte superior andisol y en la parte inferior ultisol (Foto: Sánchez, J.)



orgánica, se acumula en cantidad alta en el componente orgánico y es muy resistente a la descomposición microbial (mineralización); se ha encontrado que el porcentaje de nitrógeno mineralizable en suelos de cenizas volcánicas es inferior a la mitad del que se encuentra en suelos no volcánicos con contenidos similares de materia orgánica (Shoji, *et al.*, 2002).

El fósforo disponible, de alta demanda en la agricultura moderna, es muy bajo en los andisoles ya que es fuertemente retenido por los materiales no cristalinos de aluminio y de hierro; de otra parte, el fósforo aplicado al suelo reacciona rápidamente con los citados materiales y termina formando componentes insolubles metal-fósforo, productos en los que desempeñan papel preponderante el aluminio y el hierro activos (Shoji, *et al.*, 2002).

El abastecimiento de potasio en los andisoles es fuertemente gobernado por el contenido de potasio en la ceniza volcánica y en las arcillas del suelo. El contenido de K es bajo en andisoles formados de cenizas basálticas debido al escaso contenido encontrado en estos materiales y es también muy bajo en arcillas alofánicas porque estas no presentan retención preferencial por el potasio, por lo que se lava y decrece a medida que avanza la meteorización (Shoji, *et al.*, 2002).

Shoji, *et al.* (2002) indican que en los andisoles se han encontrado severas deficiencias de varios micronutrientes; los más señalados son cobre, zinc y cobalto. Indican además que la abundancia y disponibilidad de los elementos menores depende de la cantidad de estos en los materiales volcánicos y de la tasa de liberación a través de la alteración química.

4. MINERALÓGICAS Y MICROMORFOLÓGICAS:

fracción coloidal constituida por materiales de bajo grado de ordenamiento u orden cristalino (alófanos, imogolita y ferrihidrita), que gobiernan su comportamiento.

En la fracción arcillosa predominan las arcillas neoformadas como caolinita y esmectitas, por lo general mal cristalizadas; sin embargo, la composición mineralógica como tal depende en sí del grado evolutivo del andisol: esmectitas en etapa juvenil y caolinita en estado maduro. Aunque no frecuentes, es también corriente en la arcilla encontrar haloisitas asociadas con: climas en etapa de sequedad, suelos enterrados; micas o illita; vermiculita; cristobalita y óxidos e hidróxidos de hierro y de aluminio cristalino o amorfo.

Los andisoles típicos se caracterizan por un contenido mínimo de alófano de 10 % (extracción con el reactivo de Tamm combinado con ditionito de sodio), mientras que los intergradados ándicos contienen del 5 al 10 % de alófano (Duchaufour 1984).

La mineralogía de las arenas está relacionada con la composición original de los piroclastos (desde riolítica hasta basáltica) y en ella reviste especial importancia el vidrio volcánico; los minerales ferromagnesianos, los feldespatos y el cuarzo se presentan variando en cantidades relativas de acuerdo con la naturaleza mineralógica del material volcánico (Sánchez 2006; Pulido 2006)

La micromorfología de los andisoles deja ver fábricas de suelo porfíricas y con isotropía relevante (fábrica sin diferenciar) del material fino (plasma) en todo el perfil del suelo. Es notoria la estructura en gránulos y en bloques subangulares, los fragmentos de toba y la fábrica porfírica del material de suelo (Pulido 2006).

3. ALFISOLES Y ULTISOLES

La translocación que se refiere al *lessivage* o iluviación de arcillas o la transferencia de compuestos o elementos dentro del suelo involucra fenómenos de eluviación - iluviación, calcificación-decalcificación, salinización, desalinización, alcalinización, dealcalinización y «lessivage»; todos los cuales se relacionan con procesos específicos, dadas las condiciones requeridas para que ocurran, ya sea por condiciones climáticas, tipo de humus/medio químico

que en última instancia definen la génesis asociada a ellos (Pulido 2006).

La lixiviación de las arcillas puede ocurrir en sentido descendente, ascendente u oblicuo, e incluye una amplia gama de compuestos y materiales. Entre los mecanismos relacionados con ello se destacan: migración de sales solubles, queluviación mediante formación de complejos órgano-minerales y la translocación de partículas en suspensión (Kleber 2000).

Los mecanismos asociados con la iluviación se favorecen mediante determinadas condiciones físicas, químicas y biológicas. El clima, la presencia de horizontes arenosos o arcillosos y el tipo y densidad radicular son ejemplos de aquellos que influyen sobre las físicas, mientras que el pH, las condiciones permanentes o estacionales del potencial de oxidación, la pérdida de carga en arcillas y la concentración de Ca en profundidad lo son de las químicas (Faivre 1973; Elliott, *et al.*, 2009). La lixiviación se ve afectada por la solubilidad de los compuestos, condiciones de desaturación y decarbonatación y, en algunos casos, por ciclos biogeoquímicos de algunos elementos como Si, K, N, Ca y Mg a través de la vegetación, mientras que Al y Fe intervienen en menor grado (Malagón, *et al.*, 1996).

Las partículas en suspensión se asocian en su dinámica de elucidación-iluviación al transporte mecánico, al que es promovido por la facilidad de dispersión de los coloides minerales y orgánicos, el pH, las concentraciones de Fe y Al, la presencia de carbonato de calcio, los compuestos orgánicos solubles y las condiciones climáticas. De esto se colige que las condiciones del medio son especialmente importantes, de tal manera que por ejemplo, el carbonato de calcio activo limita la migración arcillosa; el inicio de la decarbonatación permite la movilidad de las arcillas finas y, a medida que esta continua (medios en la cercanía de la neutralidad), el Ca y el Fe promueven la formación de agregados arcillo-húmicos, los cuales disminuyen la translocación de las arcillas gruesas (Gunal, *et al.*, 2006).

De acuerdo con Malagón, *et al.* (1996) en medios más ácidos y dependiendo del potencial de oxidación y del contenido en materiales orgánicos, la translocación arcillosa se verá disminuida (poca materia orgánica) o podrá incrementarse (al aumentar la materia orgánica), lo que está asociado a fenómenos de recubrimiento orgánico, lo cual favorece el mecanismo en mayor grado al producirse además la quelación del Fe y del Al (elementos floculantes).

La influencia del medio edáfico sobre la naturaleza de los horizontes iluviales se ejemplariza a partir de tres condiciones: medio alcalino, medio muy ácido y medio moderadamente ácido (Malagón, *et al.*, 1996).

En un medio alcalino la acción del carbonato de sodio favorece la dispersión y translocación de las arcillas. Bajo ciertas circunstancias puede llegar a formarse el horizonte nátrico, el cual integra la iluviación de arcilla con porcentajes altos de Na intercambiable (horizonte Btn).

Medios muy ácidos y bajo la acción específica de compuestos húmicos degradantes y quelatantes, constituyen el horizonte espódico (horizonte Bs, Bh o Bhs), en el cual Al y/o Fe se presentan floculados, en mayor o menor grado de asociación con materiales húmicos.

En medios moderadamente ácidos pueden generarse horizontes argílicos (horizonte Bt), por la migración mecánica e iluviación arcillosa en grado significativo.

El desarrollo de horizontes argílicos, nátricos (argílicos alcalinizados) y kándicos (argílicos evolucionados transicionales a óxicos) a través de procesos de eluviación-iluviación de arcillas, se lleva a cabo mediante el proceso general de translocación discutido previamente, con subprocesos que definen diversos tipos del mismo y que se modifican en respuesta al medio donde ocurre la translocación.

Eluviación e iluviación o «lessivage» (lixiviación) es el proceso específico según el cual las arcillas migran mecánicamente a partir de los horizontes eluviales y se concentran en los iluviales (**Figura 4**); la arcilla inicia su movilización en estado disperso, vale decir bajo la forma de partículas aisladas, razón por la cual se ve afectado por procesos de floculación, agregación, presencia de agentes cementantes, etc., al igual que por el tipo de arcillas y las condiciones del medio (pH, Na, Al, Fe, M.O).

Por otra parte, la acumulación arcillosa está regida por condiciones químicas como la presencia de carbonatos y físicas, en especial el clima edáfico, la estacionalidad y la presencia de raíces, ésta última influye sobre la profundidad a la cual se encuentra el horizonte enriquecido en arcillas, dado su efecto deshidratante en la zona de mayor concentración.

El grado de desarrollo y expresión de los horizontes Bt varía ampliamente, al igual y en correspondencia con los efectos correlativos que definen: niveles de hidro-

morfismo superficial (capas «colgantes» o estacionales), facilidad o no de penetración radicular e intercambio gaseoso (Malagón, *et al.*, 1996).

Los horizontes de enriquecimiento de arcilla presentan una amplia gama de características y propiedades derivadas de los subprocesos que acompañan la translocación e iluviación arcillosa; la morfología de dichos horizontes es también variable y muestra las marcas que constituyen la evidencia de tales subprocesos.

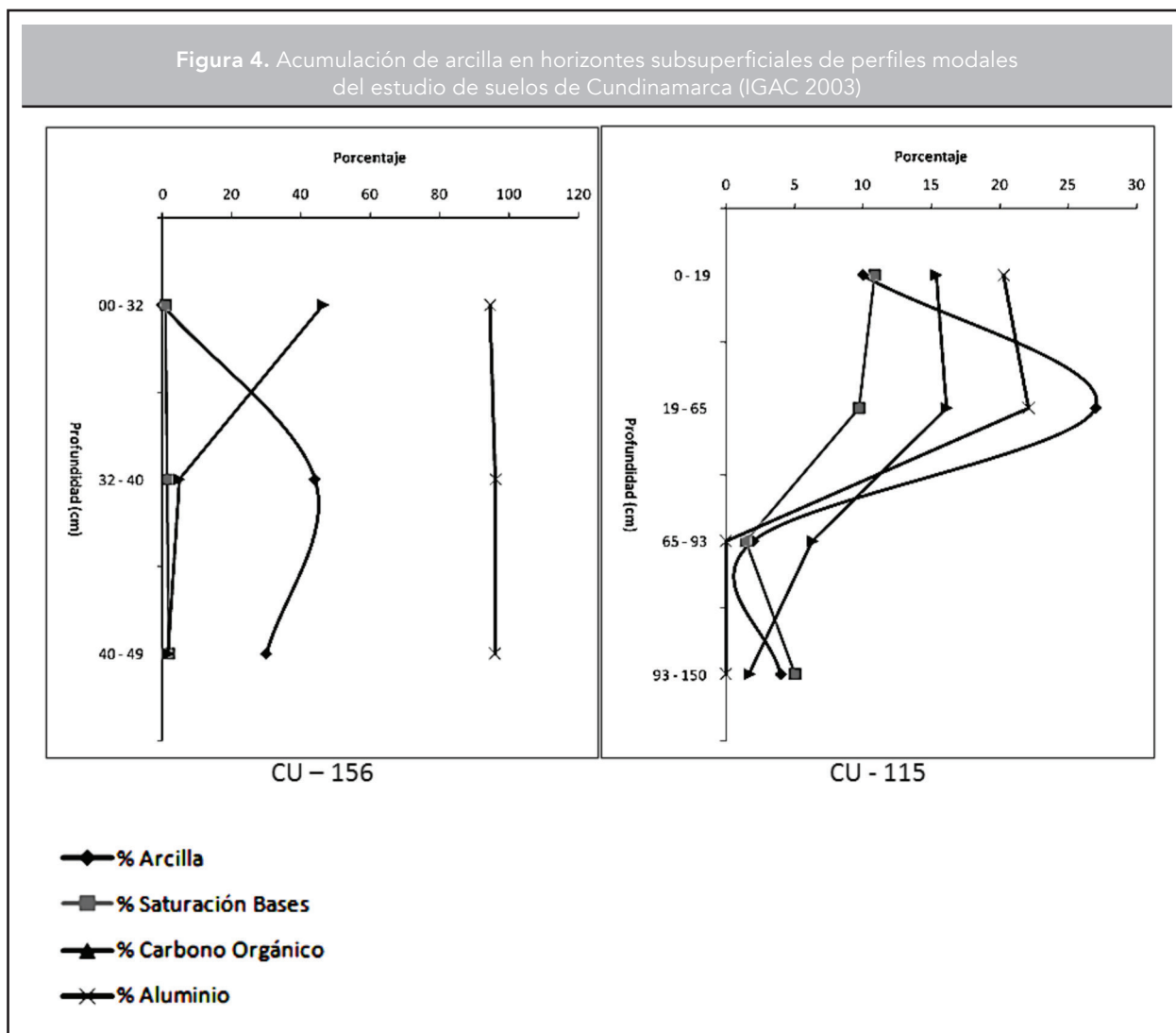
En medios poco ácidos y oxidados los recubrimientos arcillosos se encuentran generalmente asociados o exhiben películas de Fe de coloración parda rojiza y ferranes; estos rasgos varían al acentuarse el hidromorfismo cuando se moviliza el Fe y se concentra en horizontes, algunos de los cuales en medios estacionales dan origen a materiales plinticos.

Los horizontes argílicos se pueden formar a través de procesos sucesivos bajo condiciones paleoclimáticas; ello es evidente en Colombia en relación con los Ustalfs que se encuentran en varias regiones del país y a los que frecuentemente se hace referencia como «suelos Techo» o «suelos Bojacá»; suelos de este suborden se han descrito y clasificado en Tausa, Sutatausa y Guasca (municipios de Cundinamarca), Huila, Nariño, Mercaderes (Cauca), alrededores de Tunja (Boyacá) y en muchas otras áreas del país (Malagón, *et al.*, 1996). La influencia de cenizas volcánicas y regímenes ústicos han generado en estos suelos procesos que conducen a la formación de duripanes (Durustalfs). En México y Suramérica estos suelos comúnmente son denominados «tepetates»; la extensión que abarcan es variable pero son importantes debido a las limitaciones que ofrecen para su utilización, al alto costo para mejorar su productividad y a la erosión intensa que sufren (Malagón, *et al.*, 1996).

El tema de los suelos volcánicos endurecidos fue analizado en el primer Simposio Internacional en México en 1991, como respuesta a inquietudes científicas y técnicas relacionadas con su origen, evolución, endurecimiento y recuperación; dado además, su presencia en áreas de alta densidad poblacional en la mayoría de los países volcánicos de América Latina (Zebrowski, *et al.*, 1992).

El término «tepetate» (Malagón, *et al.*, 1996) ha sido utilizado en varios países para hacer referencia a horizontes endurecidos en suelos derivados de ceniza volcánica, y que han sido cementados por una mezcla de arcillas y sílice. El endurecimiento ocurre por la alternancia de depósitos

Figura 4. Acumulación de arcilla en horizontes subsuperficiales de perfiles modales del estudio de suelos de Cundinamarca (IGAC 2003)



suelos y depósitos consolidados en climas subhúmedos a semiáridos, con precipitaciones que no exceden los 800 a 900 milímetros al año y déficit hídrico en más de cinco meses al año, lo cual determina regímenes de humedad ústicos en el suelo, de otra parte, los regímenes de temperatura dominantes son los isomésicos e isotérmicos. Se encuentran en áreas con pendientes suaves de piedemontes (pie de laderas) y mesas y bajo la influencia de cenizas volcánicas.

Estas circunstancias provocan la disminución de la meteorización de las tobas, y la acumulación (proceso pedológico) de arcillas y hierro y ocasionalmente la de sílice y/o carbonatos de calcio; el endurecimiento asociado con las tobas implica condiciones de tiempo, composición mineralógica, clima seco y procesos más del campo geológico

que del pedológico, razón por la cual se remite al lector para su detalle a las memorias del seminario mencionado previamente (Zebrowski, *et al.*, 1992).

Faivre y Gaviria (1992) señalan que la extensión cubierta por este tipo de suelos de Colombia abarca entre el 3,5 y el 4,5 % del área de la Región Andina y se localizan en las partes bajas de las vertientes, sin importar la altitud. El proceso de endurecimiento en los tepetates (generalmente Durustalfs) en Colombia lo atribuyen estos autores a condiciones climáticas secas, durante un tiempo prolongado, como se evidencia en muchas acumulaciones recientes de cenizas volcánicas en la Sabana de Bogotá; en climas más húmedos se ha formado la alteración de los piroclastos,

generando materiales arcillosos (argilización) y evitando su cementación (Malagón, *et al.*, 1996).

En Colombia el proceso de endurecimiento como tal ha sido vinculado a la acción del silicio y no a la iluviación arcillosa, muy frecuente en estos horizontes. La mayoría de los tepetates se derivan de un material consolidado, similar a la toba, con predominio de materiales finos, del tipo de las cenizas volcánicas.

El estudio de una secuencia de Ustalfs en cercanías de Bogotá (Pulido, *et al.*, 1990), permitió definir cambios climático-vegetacionales y aportes de cenizas volcánicas ocurridas en los últimos 50.000 años, a partir del registro de rasgos morfológicos como presencia de horizontes Bt de la que se infiere la ocurrencia de subprocesos correlacionados con cementación, óxido-reducción, formación de plintita, ambiente edáfico actual con tendencia a la neutralidad y a la concentración de carbonatos y mecanismos marcados de migración mecánica de arcillas.

La translocación arcillosa es un proceso importante en la génesis de muchos suelos en Colombia. A continuación se describe este proceso relacionado con los Alfisoles y Ultisoles; adicionalmente, se presentan comentarios sobre los Oxisoles, suelos que presentan un horizonte kándico suficientemente alterado que permite definirlos.

En Alfisoles y Ultisoles el perfil adquiere una etapa avanzada de expresión en función del grado de manifestación del horizonte argílico. En los primeros se presenta una reserva potencial de minerales alterables y un mayor grado de fertilidad que en los segundos; estos representan una última etapa de evolución (Ult: ultimis: último), especialmente referida a las condiciones de la zona templada (Malagón, *et al.*, 1996).

En estos suelos, aparte del proceso principal de la translocación arcillosa, se presenta una amplia variedad de subprocesos genéticos que definen categorías inferiores al Orden en la taxonomía de suelos (Soil Survey Staff, 1999); entre ellos vale la pena señalar los que conducen a definir horizontes nátrico, álbico, kándico, duripan, fragipan, plintita e hidromorfismo en los Alfisoles y horizontes álbico y kándico, fragipan, plintita, ganancia de materiales húmicos e hidromorfismo en los Ultisoles. De lo anterior se deduce similitud genética en muchas características de estos suelos, con excepción de las relacionadas con la presencia de bases, sodio y dinámica del silicio, más cercana

a los alfisoles que a los ultisoles, debida principalmente al medio en el cual evolucionan.

Los procesos que definen las características típicas en estos suelos constituyen evidencias adicionales de la complejidad de sus mecanismos evolutivos; entre ellos se destacan inter o extragrados vérticos, arídicos y petrocálicos para los Alfisoles y ándicos, espódicos y petroferricos para los Ultisoles.

Duchaufour (1984) define tres fases de alteración en condiciones de clima cálido: fersialitización, ferruginación y ferralitización; ellas son poco dependientes de la acción genética de la materia orgánica y constituyen parte esencial de los ciclos largos de evolución.

Los suelos fersialíticos, si bien pueden compararse con algunos de los Alfisoles en Colombia, presentan variaciones en características diferenciadoras muy considerables, en especial los requerimientos climáticos (clima del tipo mediterráneo más cercano al subtropical que al tropical) que conducen a tipificar características como la dinámica del Fe y su relación con las síntesis de arcillas 2:1. Las características compartidas son: la formación del horizonte argílico, su composición mineralógica y la tendencia a una saturación relativamente alta en bases (Malagón, *et al.*, 1996).

Si bien en la zona templada y en especial, bajo la acción de climas mediterráneos sobre formaciones calcáreas, se presenta la rubefacción (transformación de goetita a hematita por medio de deshidroxilación), en condiciones colombianas ello es mucho más reducido y solo en contadas excepciones se alcanza alguna similitud con ella (por ejemplo en Villa de Leyva, Boyacá).

La etapa de la ferruginación se presenta en Colombia especialmente en climas actuales, cálidos y húmedos y generalmente bajo condiciones hidromórficas en climas estacionales de sabana; evidencias morfológicas paleoclimáticas se presentan con alguna frecuencia en zonas de cordillera que se encuentran hoy día bajo climas más fríos y con tendencia húmeda.

En la ferruginación la evolución es mayor que en el proceso antes comentado, por lo que la composición mineralógica está representada por minerales más resistentes; las arcillas dominantes de síntesis son de tipo 1:1 y los compuestos de Fe son relativamente abundantes que generan colores pardo rojizo amarillentos, no resultantes de la

rubefacción, sino de la evolución del Fe en medios húmedos sin estaciones drásticas de sequía (Malagón, *et al.*, 1996).

Los suelos ferruginosos ácidos a que se hace referencia en el país corresponden a los Ultisoles presentes, especialmente, en la Amazonia, en algunas zonas de la Orinoquia y, posiblemente, en el Andén Pacífico; es decir, bajo climas cálidos y húmedos con amplia o baja estacionalidad (épocas secas) y desarrollados a partir de materiales parentales sedimentarios, por lo general re TRABAJADOS y alterados.

Estos suelos, en amplias extensiones del país, se acercan más a los definidos como ferrisoles (Duchaufour 1984) que a los ferruginosos tropicales típicos; ello se comprueba por su alta acidez, por la clasificación «Pale» a nivel del gran grupo, por la presencia de horizontes kándicos en varios de ellos, por «familias» mineralógicas silíceas o cao-línicas y por la presencia de gibsita (Pulido, *et al.*, 1993); bajo condiciones hidromórficas estas características son variables (Malagón, *et al.*, 1996) al igual que en zonas de montaña y en otros ambientes climáticos.

REFERENCIAS

- Ávila-Pedraza, E. A. (2005). Los suelos de Colombia y sus estadísticas más recientes. *Análisis Geográficos* 29, pp. 13-21.
- Besoain, E. (1985). *Mineralogía de arcillas de suelos*. IICA, San José, Costa Rica, pp. 123-939.
- Dahlgren, R. A.; Saigusa, M.; Ugolini, F.C. (2004). The Nature, Properties and Management Of Volcanic Soils. *Advances in Agronomy*, 82, pp. 113-182.
- Duchaufour, P.H. (1984). Edafología, edafogénesis y clasificación. Masson, S.A. Paris, Francia, 493 p.
- Elliott, P.E.; Drohan, P.J. (2009). Clay Accumulation and Argillic-Horizon Development as Influenced by Aeolian Deposition vs. Local Parent Material on Quartzite and Limestone-Derived Alluvial Fans. *Geoderma*, 151 (3-4), July, pp. 98-108.
- Faivre, P. (1973). El concepto de planosol: su aplicación en Colombia. Texto de una conferencia dictada por: P. Faivre. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Subdirección Agrológica. Bogotá, Colombia.
- Faivre, P., Gaviria, S. (1992). Suelos y formaciones piroclásticas endurecidas en los Andes de Colombia. *Terra*, 10, septiembre, pp. 89-99.
- Gunal, H.; Ransom, M.D. (2006). Clay Illuviation and Calcium Carbonate Accumulation Along a Precipitation Gradient in Kansas. *Catena*, 68, pp.59-69
- (IGAC) Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2003). Estudio general de suelos del Departamento de Cundinamarca. Subdirección de Agrología. Bogotá.
- Kleber, A. (2000). Compound Soil Horizons with Mixed Calcic and Argillic Properties Examples from the Northern Great Basin, USA. *Catena* 41(1), September, pp. 111-131.
- Malagón, D.; Pulido, C., Llinas, R., Chamorro, C., Fernández, J. (1996). Suelos de Colombia, origen, evolución, clasificación, distribución y uso. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Subdirección de Agrología. Bogotá, Colombia.
- Malagón, D.; Pulido, C., Llinas, R. (1991). Andisoles. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Subdirección de Agrología 3: 1, Bogotá, 118p.
- Mejía, L. (1980). La Mineralogía del suelo y sus relaciones con la fertilidad, pp. 29-84. En: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (ed.) Fertilidad de suelos, diagnóstico y control, Bogotá.
- Moustakas, N.K.; Georgoulas, F. (2005). Soils Developed on Volcanic Materials in the Island of Thera, Greece. *Geoderma*, 125, pp. 125-138.
- Nanzyo, M. (2002). Unique Properties of Volcanic Ash Soils. *Global Environmental Research*, 6, pp. 99-112.
- Pulido, C. (2006). Andisoles, pp. 1-10. Instituto Geográfico Agustín Codazzi- Colciencias. En: Estudio de las sustancias húmicas en andisoles y mollisoles de Colombia desarrollados bajo ambientes ecológicos diferentes. Sin publicar. Bogotá, Colombia.
- Pulido, C.; Malagón, D. (1993). Génesis, propiedades y características diagnósticas de los ultisoles y su relación con el manejo de las tierras, 171-268 pp. Sección 3, Cap. 2. En Aspectos ambientales para el ordenamiento territorial del Occidente del departamento del Caquetá. Proyecto INPA- 1. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Subdirección de Agrología. Ed. Tercer Mundo. Bogotá, Colombia.

- Pulido, C.; Malagón, D.; Llinás, R. (1990). Paleosuelos del piso alto andino en la región montañosa circundante a Bogotá. *Revista Investigaciones*, 2(2), 198p.
- Sánchez, J.A. (2005). Caracterización y zonificación edafológica de ecosistemas de alta montaña de los páramos Cuacanos, municipios de Puracé, Silvia y Totoró. *Análisis Geográficos*, 33, 84 p.
- Shoji, S.; Takahashi, T. (2002). Environmental and Agricultural Significance of Volcanic Ash Soils. In Japan. *Global Environmental Research*, pp. 133-135.
- Soil Survey Staff (1999). *Soil Taxonomy, a Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. 2 ed. Soil survey staff. USA, Natural Resources Conservation Service. Agriculture Handbook N. 436, Washington D.C., USA. 868p.
- Takahashi, T.; Shoji, S. (2002). Distribution and Classification of Volcanic Ash Soils. *Global Environmental Research*. 6(2), pp. 83-98 Volcanic Ashes and Their Soils. AIRIES, Japan.
- Tsai, C.C.; Chen, Z.S.; Kao, C.I.; Ottner, F.; Kao, S.J.; Zehetner, F. (2010). Pedogenic Development of Volcanic Ash Soils Along a Climosequence in Northern Taiwan. Contents Lists Available. *Geoderma*, 83, pp.127-181.
- Zebrowski, C.; Prat, C.; Etchevers, B.J.; Arias, R.; Miranda, H.M. (1992). Suelos volcánicos Endurecidos. *Terra*, 10. I Simposio Internacional, México 20-26 octubre 1991. Sociedad Mexicana de las Ciencias del Suelo, 572p.
- Zehetner, F., Miller, W.P. (2006). Soil Variations Along a Climatic Gradient in an Andean Agro-Ecosystem. *Geoderma*, 137, pp. 126-134.

**PARA CITAR ESTE ARTÍCULO /
TO REFERENCE THIS ARTICLE /
PARA CITAR ESTE ARTIGO /**

Sánchez-Espinosa, J.A. (2015). Procesos específicos de formación en andisoles, alfisoles y ultisoles en Colombia. *Revista EIA*, 12(E2) junio, pp. E85-E97. [Online]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.14508/reia.2015.12.E2.85-97>.