

Génesis de suelos y paleosuelos ándicos a partir del estudio de pedocomponentes (parte II)

María Teresa Flórez Molina* y Luis Norberto Parra S.**

Resumen

Las diferentes secuencias de suelos estudiadas en San Félix, Caldas, fueron formadas por procesos pedogenéticos típicos. El techo y piso de la secuencia El Cedral están caracterizados por horizontes húmicos, con una intensa melanización producida bajo clima frío. La andolización es el proceso pedogenético dominante en la secuencia Salamina y su génesis está acompañada por climas más calurosos que los actuales. Contrastando con las dos secuencias precedentes, Pácora estuvo afectada por una intensa gleyzación en condiciones pluviales.

----- *Palabras clave:* pedocomponentes, paleosuelos, ándicos, procesos, pedogenéticos, melanización, gleyzación, andolización.

Abstract

Three different soil sequences were studied at San Felix, Caldas and each one have been formed below typical pedogenetic processes. The top and foot of El Cedral sequence are characterized by humic horizons owing to intense melanization produced during cool climates. The andosolization were the dominant pedogenetic process that operated during the Salamina sequence and your genesis was accompanied by climates more warm than today. Contrasting with the two precedent sequences, the Pácora were affected by an intense gleyzation and pluvial conditions.

----- *Key words:* pedocomponents, paleosoils, ándicos, procces, pedogenetic, melanization, gleyzation, andolization.

* Docente investigador Msc. Universidad de Antioquia. E-mail: pmtfm146@udea.edu.co.

** Docente investigador Msc. Universidad Nacional. E-mail: lnparra@perseus.unalmed.edu.co.

Introducción

La zona en donde se levantó el perfil tipo para establecer la génesis de los suelos y paleosuelos ándicos de las secuencias El Cedral, Salamina y Pácora, se localiza en el corregimiento de San Félix, Salamina, Caldas. El paisaje dominante son colinas redondeadas, amplias, recubiertas por espesas capas de piroclastos provenientes de los volcanes de la parte norte de la cordillera Central.

Procesos edáficos deducibles de los pedocomponentes

La formación de un suelo representa el conjunto de procesos químicos, físicos y biológicos que ocurren en éste y determinan una u otra composición y propiedades de la masa del mismo. Como todos los procesos naturales, el proceso de formación del suelo se caracteriza por unos fenómenos muy diferentes y opuestos que se producen al mismo tiempo, por ejemplo: 1) formación de sustancias orgánicas y su destrucción; 2) acumulación de sustancias orgánicas e inorgánicas y su lavado o translocación; 3) descomposición de los minerales y síntesis de los nuevos; 4) penetración de la humedad en el suelo y su regreso a la atmósfera y 5) absorción de la energía del Sol, acompañada del calentamiento del suelo, y radiación de la energía, acompañada de enfriamiento, etc.

En cada suelo natural ocurren y se desarrollan al mismo tiempo todos esos fenómenos; pero en diferentes etapas de desarrollo y bajo la influencia de una u otra combinación de condiciones ambientales, cada fenómeno o grupo de fenómenos puede dejar una expresión más fuerte y clara. Todos estos fenómenos y procesos en el suelo están condicionados por la vitalidad de los organismos vivos, la cual, a su vez, se regula por las condiciones climatológicas e hidrotérmicas.

Cuando las plantas se mueren, sus restos (raíces, hojas y tallos) penetran en la capa superficial de la tierra y sirven no solamente como fuente de energía para la formación del suelo, sino también como material para la síntesis de nuevos compuestos orgánicos y organominerales específicos del suelo.

Algunos de los procesos que han sido inferidos a partir de las evidencias dejadas en los pedocomponentes, y se relacionan aquí como un resumen los más definidos (véase figura 1) son:

Proceso de acumulación

La incorporación de materia orgánica fresca y parcialmente descompuesta tiene gran importancia en la formación del suelo, ya que está relacionada con su transformación dentro del mismo y, en particular, los coloides orgánicos de suelo. Éstos tienen gran capacidad absorbente y fijan las partículas minerales que forman los agregados del suelo, característica muy importante en la creación de la estructura del suelo y de las propiedades físicas favorables relacionadas con ésta. La incorporación de materia orgánica y su acumulación elevada conducen a la formación de horizontes humíferos muy característicos de los suelos estudiados. Los horizontes humíferos que exhiben parcialmente estas condiciones son los siguientes:

1. El carácter de la transformación de los compuestos minerales en el suelo.
2. Sus propiedades físicas.
3. Depósito anual en los horizontes superiores del suelo y sobre su superficie, de grandes masas de restos orgánicos, ricos en elementos nutritivos.
4. Liberación de bases, en la parte mineral del suelo, y lavado rápido.
5. Adecuada humedad del suelo, protegiéndolo de la mineralización orgánica rápida de los restos, y contribuyendo a la acumulación de la sustancia orgánica en forma de humus.

Índice de acumulación orgánica (IAO)

El índice de acumulación orgánica (IAO), para los suelos y paleosuelos, permite establecer la relación que puede existir entre los componentes orgánicos (estructurados, más no estructurados, más fitolitos) con los materiales inorgánicos (minerales y mineraloides); es decir, entre materiales autóctonos y aloctónos o materiales

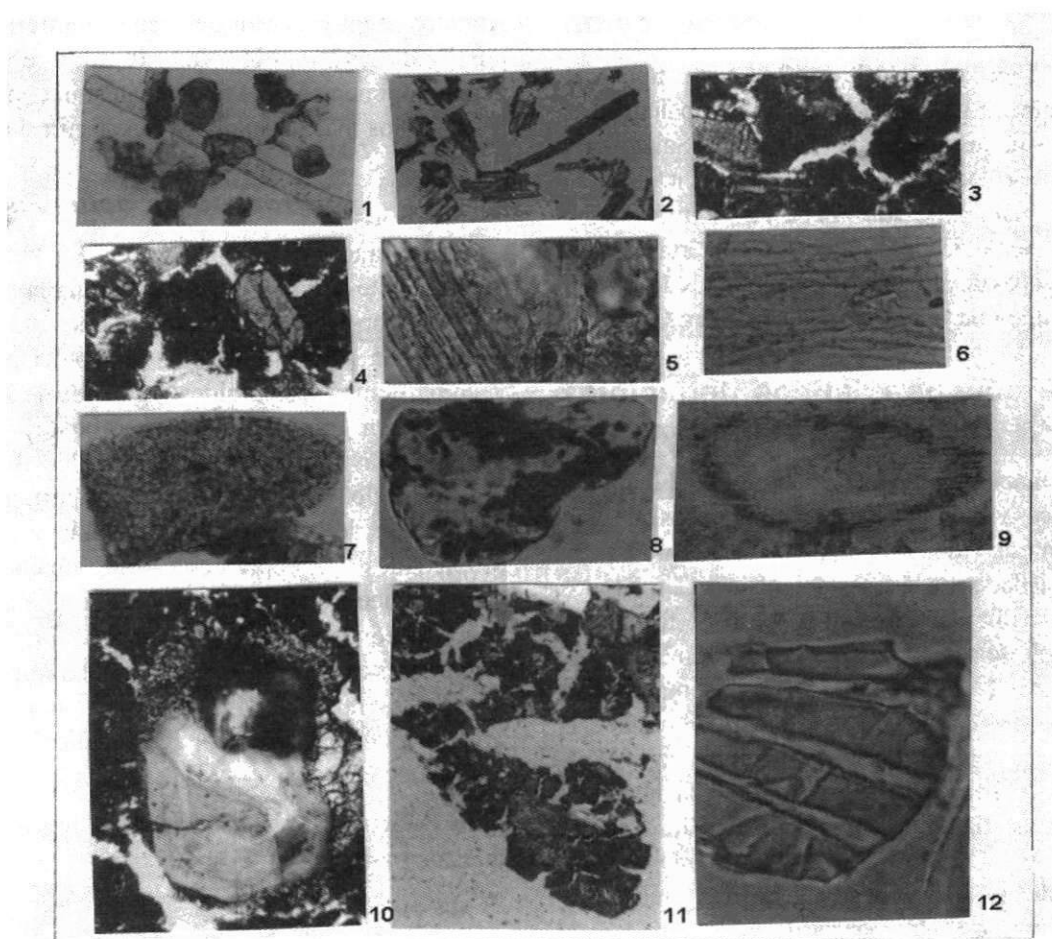


Figura 1 Procesos pedogenéticos de suelos y paleosuelos ándicos reflejados en sus pedocomponentes
 1-2: acumulación, 3-4: humificación, 5-6: descomposición, 7-8: formación de amorfos, 9-12: meteorización (oxidación, reducción, disolución, corrosión).

con pedogénesis y sin pedogénesis. Este índice, tal como está aquí definido, reporta su valor numérico y la correspondiente curva (véase figura 2).

El índice de acumulación orgánica (*IAO*) puede calcularse así:

$$IAO = \frac{(POE + PONE + Ft)}{(PCI)} \quad (1)$$

donde:

POE: pedocomponentes orgánicos estructurados, por miles

PONE: pedocomponentes orgánicos no estructurados, por miles

Ft: fitolitos totales, por miles

PCI: pedocomponentes inorgánicos, por miles

De este cálculo se excluyen los agregados órgano-minerales y las películas rojas, por considerarse productos mixtos.

De acuerdo con la figura 2, se concluye lo siguiente:

- a. La materia orgánica disminuye con la profundidad, en general, en todas las secuencias, ex-

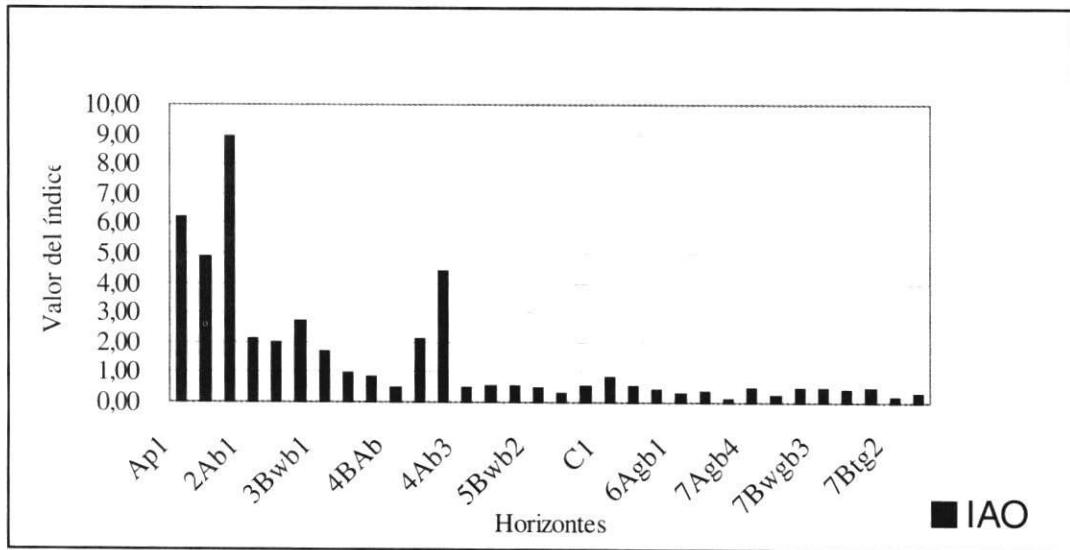


Figura 2 Variación del índice de acumulación de materia orgánica (IAO) en las secuencias El Cedral, Salamina y Pácora

cepto en algunos horizontes de El Cedral y Salamina; dicha disminución no es regular, ya que presenta aumentos en algunos horizontes de las secuencias (p. e. 4Ab2).

- b. En la secuencia El Cedral, el *IAO* tiene sus valores más altos en los horizontes humíferos, visibles también macroscópicamente en el perfil y corroborados por datos de Jaramillo [1, 2, 3] y Arango y González [4], lo que podría significar que el *IAO* puede emplearse como sustitutivo de otras técnicas tradicionales para la materia orgánica, ya que se preservan las tendencias. Esta secuencia tiene el comportamiento más irregular con respecto a las demás, y los tres horizontes superiores (Ap_1 , Ap_2 y Ap_3) presentan el mayor contenido de materia orgánica, como era de esperarse; sin embargo, de los tres, Ap_3 presenta el mayor valor y no Ap_1 , que debería presentar el mayor valor debido a que es el horizonte que recibe directamente el material orgánico fresco, pero puede ser que Ap_3 reciba materia orgánica. En los horizontes 2Ab se registra una disminución muy brusca del contenido, luego aumenta levemente en el horizonte cámbico (3ABb) y, a partir de éste, disminuye con la profundidad; aumenta luego, en los ho-

rizones 4Ab₁ y 4Ab₂, en donde tiene alto valor y significancia, debido a que son los horizontes enterrados humíferos localizados en la base de la secuencia, hecho que permite pensar que ellos rápidamente fueron enterrados, conservando mucho de su material orgánico aún sin descomponer; en 4Ab₃ y 4Ab₄ disminuye fuertemente el contenido, pudiéndose explicar este hecho por la presencia de la discordancia erosional.

- c. En la secuencia Salamina se observa un comportamiento normal en los tres primeros horizontes, es decir en los 5Bwb; luego, aumenta en el plácico y hasta C₁, y disminuye con la profundidad en los otros dos horizontes (C₂ y 2C). En esta secuencia, la materia orgánica tiene doble comportamiento que está interrumpido por el horizonte plácico, en el cual el valor del índice aumenta levemente, lo que podría estar indicando la afinidad de la materia orgánica con los óxidos férricos y su facilidad para formar quelatos. Los horizontes 5Bwb y los C, con su comportamiento, estarían demostrando sus diferencias, por lo menos en contenidos de materia orgánica, o lo que puede expresarse de otra forma, se observa claramente la discontinuidad que existe entre ellos. Debi-

do a que los horizontes C son grueso granulares y clasto soportados, existe translocación hacia la base.

- d. En la secuencia Pácora se observa un comportamiento casi constante, pero siempre con valores muy bajos de materia orgánica, lo cual es perfectamente comprensible, debido a que en esta secuencia, dada su edad y grado de evolución, es muy poco probable que se encuentren altas cantidades de material orgánico fresco; toda la materia orgánica que se encuentra, está en alto estado de degradación y transformación. Los valores más altos se presentan en los horizontes 6Agb₂, 7Agb₄, 7Bwgb y 7Btg₂; en éstos, excepto en los 7Bwgb, el comportamiento parece indicar, con su leve aumento, que la materia orgánica se lixivió desde el horizonte inmediatamente superior.
- e. El índice de acumulación orgánica (IAO), también podría estar mostrando el grado de preservación que presentan los componentes y podría utilizarse, potencialmente, como medidor de la materia orgánica.

Proceso de descomposición

La degradación de la materia orgánica (hojas, frutos, tallos, raíces, insectos, hongos, etc.) y la posterior formación de humus, constituyen el proceso principal en la formación del suelo y determinan, parcialmente, el carácter de la transformación de los compuestos minerales en éste y sus propiedades físicas. Las reacciones en el suelo y la gran cantidad de alimentos minerales provocan, a su vez, el desarrollo de la microflora bacteriana.

Una vez que han caído las capas de ceniza volcánica sobre un suelo o roca preexistente, se comienza a dar la descomposición del material orgánico fresco que se encontraba en el suelo y empieza a recibir material orgánico nuevo que es aportado desde la superficie; éstos son degradados por macro, meso y microorganismos descomponedores. El gas carbónico que se desprende durante la respiración de los microorganismos y la descomposición de las partes orgánicas, se disuelve en el agua y se acelera la

descomposición. Como resultado de este proceso se forman pequeñas partículas y sustancias húmicas y se va formando así el suelo; pero en este proceso no todo se degrada al mismo tiempo y de la misma forma, muchos fragmentos vegetales y animales pasan por diferentes estados de descomposición y presentan diferentes estados de resistencia a ésta, hasta su asimilación final como un coloide orgánico.

Generalmente es posible delinear los cambios morfológicos en la descomposición del material vegetal o animal, ya que algunos desperdicios vegetales o animales son invadidos por bacterias o por el desarrollo de micelio de hongos, en tanto que otros son desmenuzados parcialmente [1].

Ante la descomposición de los materiales orgánicos, hay dos características relevantes de éstos que son la resistencia y la preservación; la resistencia tiene que ver con la naturaleza intrínseca del material, y la preservación está más relacionada con el ambiente, los microorganismos y el tiempo. Según la resistencia, los materiales pueden clasificarse en: 1) altamente resistentes, como las resinas, y los granos de polen y esporas e hifas y cutículas; 2) medianamente resistentes, como los tejidos y tejidos lignificados; 3) baja resistencia, como la hemicelulosa y la glucosa.

En cuanto al grado de preservación, los materiales orgánicos pueden clasificarse en: 1) alta preservación, en el cual los productos no se degradan o se descomponen y es posible determinar las estructuras orgánicas, como, vasos, traqueidas, etc.; 2) intermedia preservación, en el cual es posible observar gran número de pedocomponentes localmente, sin estructura visible y 3) mala o baja preservación, en el cual es difícil distinguir que parte del pedocomponente orgánico es la que se observa. Cuando la descomposición es muy fuerte se empiezan a formar coloides orgánicos.

En el proceso de descomposición, algunas sustancias son mineralizadas y liberan compuestos inorgánicos, como: nitratos, azufre, magnesio, potasio, etc. La descomposición de los residuos orgánicos está regulada por una serie de facto-

res, que determinan el tipo de descomposición y del humus que se forma.

Desde el punto de vista químico, la descomposición de los residuos orgánicos constituye la primera fase en los procesos de humificación, donde muchos de los compuestos complejos son degradados a sustancias más simples, las cuales, a su vez, sufren la polimerización por condensación, para formar el humus, que es un polímero complejo. La reacción del suelo influye en la descomposición, porque determina el tipo de microflora que va a desarrollar. En un medio ácido la descomposición la realizan los hongos, donde son más efectivos; sin embargo, la mayor degradación de la materia orgánica ocurre a pH neutro, donde las bacterias son más efectivas. Cuanto más baja es la temperatura de descomposición tanto más lento es el proceso, tanto menor es la pérdida de la materia orgánica y mayor el contenido de nitrógeno orgánico. La temperatura óptima para las bacterias en el suelo se encuentra entre 25 y 35 °C; a 45 °C se puede efectuar una rápida descomposición y a 37 °C la oxidación se estimula y cantidades de ésta desaparecen.

La secuencia de descomposición de los pedocomponentes orgánicos es:

Hemicelulosa > celulosa > fragmentos vegetales-lignina > coágulos rojos y pseudoopacos > resinas > hongos > esporomorfos > fragmentos animales > cutículas > carbón vegetal.

Los pedocomponentes orgánicos una vez se descomponen, producen materia orgánica o humus que se manifiesta en forma de agregados orgánicos, coágulos, coloides húmicos, amorfos, complejos orgánicos y otros lixiviados, como los ácidos húmicos y los fúlvicos.

Proceso de humificación

Comprende esencialmente la formación de materia orgánica o de humus. La humedad presente en el suelo, el pH, la vegetación, así como las condiciones enzimáticas, entre otros factores, rigen la evolución y acumulación de éste. Para el

caso de los paleosuelos ándicos, puede observarse que los residuos de vegetación forman rápidamente un producto pardo o negro, o un producto amorfo; son los primeros indicios de la descomposición de los fragmentos vegetales y animales del suelo.

Proceso de formación de amorfos

Es un proceso de transformación de los pedocomponentes orgánicos e inorgánicos en materiales amorfos. La formación de amorfos empieza durante la formación primaria de los suelos, pero su máximo desarrollo lo alcanzan en los suelos más profundos. Existen dos caminos para la formación de los materiales amorfos:

1) El proceso de descomposición de los minerales primarios y 2) La síntesis secundaria. La transformación de los pedocomponentes orgánicos e inorgánicos en amorfos empieza desde la formación de las escamas sobre la superficie de éstos y termina con la transformación completa en la masa amorfa o geles. Si la acumulación de amorfos es intensa, los pedocomponentes originales desaparecen del suelo casi por completo. Esta acumulación de amorfos se lleva a cabo con la ayuda no sólo de los microorganismos, sino también como consecuencia de la vitalidad y la descomposición de las plantas superiores. La cantidad total de coágulos y de agregados orgánicos podría ser una medida del grado de humificación.

Proceso de meteorización o intemperización

La meteorización o intemperización se refiere a la descomposición y desintegración química y física de los pedocomponentes inorgánicos presentes en los suelos, que no se encuentran en equilibrio en las condiciones de temperatura, presión y humedad del espacio entre la atmósfera y la litosfera. La alteración de los pedocomponentes acompaña la formación de los suelos; es una reacción continua durante el desarrollo de éstos. La desintegración y modificación de los pedocomponentes se da con primacía en los ho-

rizontes A y B del suelo, dentro de éstos junto con los procesos biológicos y de otros tipos de formación de suelos que se asocian con ellos. Las reacciones que se producen como parte de la intemperización geoquímica del suelo son la óxido-reducción, la hidrólisis, la hidratación y la disolución (véase figura 1). En el caso de los andisoles todo esto ocurre con participación de sustancias orgánicas en la solución del suelo, lo que las hace más agresivas. La participación de sustancias orgánicas en todas estas reacciones es un rasgo muy distintivo del andisol. Dahlgren, Ugolini and Casey (1999), reportan que la química de las tefras indica una disolución incongruente de la fase sólida durante el período inicial de meteorización en ésta, los cationes básicos y el silicio son liberados por la meteorización, y el Fe y el Al son inamovibles y acumulados en la tefra; además, dicen que las tasas de meteorización de las tefras especialmente frescas son muy altas comparadas con otros materiales parentales.

Óxido-reducción. La oxidación es una reacción geoquímica importante, que se produce en los materiales del suelo en los que el contenido de oxígeno es alto y bajas las demandas biológicas de ese elemento. La reducción del Fe es un proceso de intemperización desintegrante en los minerales que contienen ese catión en su estructura y se manifiesta como un cambio del tamaño y la forma, y hace que la estructura mineral se rompa; un ejemplo de este proceso es el que le ocurre a los ferromagnesianos. El hierro liberado por esta desintegración puede ser lixiviado o unirse con el hidroxilo (OH), u oxígeno, para formar películas rojas (posiblemente óxidos o hidróxidos de Fe). Así mismo, el manganeso que se desprende mediante la alteración de los minerales primarios puede ser lixiviado o retenido; pero su química es más compleja, debido al número de estados de oxidación que posee y puede manifestarse como películas negras. La reducción se produce en el ambiente geoquímico del suelo cuando el material está saturado en agua; por ejemplo, bajo el nivel freático la existencia de oxígeno es baja y la demanda biológica de este elemento es elevada. El efecto de ésta

es la reducción del hierro a la forma ferrosa, muy móvil. En esta forma se puede perder del sistema, si hay un movimiento ascendente o descendente neto del agua freática. Si el hierro ferroso permanece en el sistema, reacciona para formar sulfuros y compuestos relacionados, que imparten los colores verdes y azul verdosos que caracterizan a muchos materiales reducidos de los suelos; caso particular, los suelos de la secuencia Pácora, en donde el techo y la base presentan esas características. Un rasgo común de algunos materiales del suelo es la fluctuación de las condiciones de oxidación a las de reducción, con frecuencia en forma cíclica, debido a las variaciones climáticas que se producen durante el año. O bien, el material inicial del suelo puede encontrarse en un ambiente reductor durante la etapa de intemperización geoquímica, pasando a continuación a un ambiente oxidante.

Hidrólisis. La hidrólisis se refiere al rompimiento de la molécula de agua y el aporte de H⁺. El resultado es el reemplazamiento de los iones básicos por el hidrógeno, lo que provoca el colapso y la desintegración de la estructura; por ejemplo, $\text{KAlSi}_3\text{O}_8 + \text{H}^+ \rightarrow \text{HAlSi}_3\text{O}_8 + \text{K}^+$. El ácido silícico participa en la formación de minerales y mineraloides; por ejemplo, con el aluminio y el silicio reorganizan el oxígeno y el hidroxilo, para formar el alófano amorfo o la halloysita cristalina. La hidrólisis es el proceso más importante de la intemperización química y da como resultado la desintegración completa o la modificación drástica de los minerales primarios intemperizados, que se observan al microscopio con superficies y bordes corroídos o llenos de oquedades microscópicamente unidas, en donde puede verse la transformación de un fitolito con superficies suaves en un fitolito con superficies completamente rugosas y de bordes irregulares.

Hidratación. La hidratación se refiere a la incorporación de moléculas de agua o grupos hidroxilo al mineral. El agua absorbida proporciona un puente o una entrada para el hidrógeno, facilitando sus ataques a la estructura, como puede verse muy bien. La asociación de agua o

hidroxilos con Al y Si en los bordes rotos no es sino la primera etapa de la hidrólisis.

La hidratación también está referida en este estudio a la que presentan algunos fitolitos, la cual aparece como en forma de anillo localizado alrededor del borde de éstos y que podría estar relacionada con: 1) la condición fisicoquímica e hídrica inicial del suelo, 2) la porosidad del fitolito, 3) la hidratación inicial del fitolito, 4) el contenido inicial de contaminantes en el fitolito provenientes del metabolismo celular, 5) el tiempo y 6) las condiciones del enterramiento.

Disolución o corrosión. La disolución más frecuentemente observada es la localizada o selectiva, que produce en los minerales o mineraloides un aspecto como de corrosión. Esta corrosión en el andisol se activa por la adherencia de materia orgánica en la superficie de los componentes, hecho que los va “desgastando” hasta perforarlos; en los clivajes de los minerales las adherencias de materia orgánica llegan a producir su ampliación, hasta que finalmente los parten según los planos de clivaje que se convierten en planos de separación. Tanto en los fitolitos como en los cristales esta corrosión empieza a manifestarse como una simple oquedad superficial, que es tan grande o pequeña como sea el tamaño del grumo orgánico adherido.

Cuando la adherencia del material orgánico se localiza en los bordes de la estructura de los cristales, la corrosión produce una acentuación del clivaje que se manifiesta como una estructura en huzo, o una estructura en astillas, como es el caso de los ferromagnesianos y las biotitas, en las cuales se manifiesta este fenómeno como una estructura en forma de cintas apiladas en todo el cristal o de anillos concéntricos del mismo tamaño que el grano. Cuando aquélla se localiza en las superficies internas del cristal, la acentuación de los clivajes es mucho más fuerte y en las plagioclasas y ferromagnesianos se acentúa más la textura en “criba”, la cual se manifiesta porque se van abriendo los planos, al igual que los clivajes, hasta que la abertura es tan grande que se produce la fragmentación del cristal; las

adherencias de materia orgánica a las superficies de los cristales también puede llegar a producir pits, o huecos con superficies roñosas. Otro fenómeno que aparece en las superficies de los minerales es el de estructuras, nombradas aquí como “superficies calvas” o “estructuras en ojo”; evidentemente son similares a un ojo alargado en su longitud mayor, sus bordes tienen apariencia astillosa e irregular y en el centro se encuentra material similar al del cristal que lo contiene, por lo general son de color amarillo y los núcleos son blancos. En los feldespatos, la corrosión superficial se manifiesta en las caras de éstos como minúsculas oquedades o como pequeñas áreas roñosas de bordes irregulares, fondo plano, escasa profundidad y formas variables que modifican la superficie lisa; la corrosión de las superficies internas llega ocasionalmente a ser tan fuerte que puede producir oquedades que alcanzan todo el ancho de la cara del cristal y, finalmente, su perforación. Las cavidades de corrosión son un fenómeno especial producido por reacción intensa y puntual entre grumos de materia orgánica y los ópalos (sílice hidratada), cuyo resultado final es un cráter que avanza desde la superficie hacia el interior del material y que en algunas ocasiones llega a atravesarlo y destruirlo parcialmente; los bordes de tal cavidad son más o menos circulares, rugosos y su forma general es cóncava; en los fitolitos que presentan forma de embudo, lo dominante es el fenómeno de corrosión; en los fitolitos que presentan formas prismáticas, el fenómeno dominante es la presencia de uno o dos anillos de hidratación. Tanto la corrosión como la hidratación producen el realce, la modificación, la creación o la pérdida de la ornamentación original del fitolito. En todos los casos de corrosión, tanto superficial como muy concentrada, su intensidad es mayor en los horizontes más enriquecidos en materia orgánica, lo que parece probar una fuerte correlación entre ambos fenómenos.

La secuencia de meteorización de los pedocomponentes inorgánicos es:

Fragmentos de matriz > fitolitos no coloreados > feldespatos-plagioclasas > vidrio volcánico >

fitolitos coloreados > biotitas > epidota > ferromagnesianos (anfíboles y piroxenos) > cuarzo > ilmeno-magnetita > zircón.

De acuerdo con esta secuencia se estableció el índice de meteorización, para conocer cuál es la relación de meteorización de los minerales más resistentes a ella, y que se calcula así:

$$IM = \frac{(\sum MM)}{(\sum MR)} \quad (2)$$

donde:

IM: Índice de meteorización.

MM: Minerales meteorizables: epidota, hornblenda, feldespatos, plagioclasas y biotita.

MR: Minerales más resistentes: cuarzo, orto y clinopiroxeno, ilmeno-magnetita, zircón.

Esta relación da como resultado un valor para cada horizonte dentro de las secuencias, el cual se gráfica y se obtiene la figura 3. Se excluyen de esta suma los vidrios volcánicos, debido a que ellos constituyen una especie de pivote central de la secuencia y, por tanto, no son un buen contraste. Este índice constituye una comprobación de lo expresado en Flórez y Parra [5].

Minerales meteorizables son aquellos que han sido fácilmente atacados por los diversos procesos volcánicos o pedogenéticos, en los cua-

les se observan las huellas o las evidencias de esos ataques y que hoy aparecen al microscopio con su estructura cristalina, parcial o totalmente alterada.

Minerales resistentes son aquellos que no han sido afectados de una manera significativa por los procesos volcánicos o pedológicos ocurridos a través del tiempo y que hoy pueden ser fácilmente reconocidos porque su estructura cristalina no se encuentra alterada.

De la figura 3, puede extractarse lo siguiente:

- En todos los horizontes de todas las secuencias se presentan mayores cantidades de minerales meteorizables que de minerales resistentes.
- Los mayores contenidos de minerales meteorizables se encuentran en porcentaje entre el 80 y el 98%, mientras que los resistentes están entre el 10 y el 40%.
- Los horizontes con mayor contenido de pedocomponentes meteorizables son 3Bwb1 y 3Bwb2, de la secuencia El Cedral, los horizontes C (C₁, C₂ y 2C), de la secuencia Salamina, y todos los horizontes de la secuencia Pácora; sin embargo, el mayor contenido de las tres secuencias se observa en los horizontes 7Btg₂ y 7BCg de Pácora. En consecuencia, se comprueba que los horizontes B y

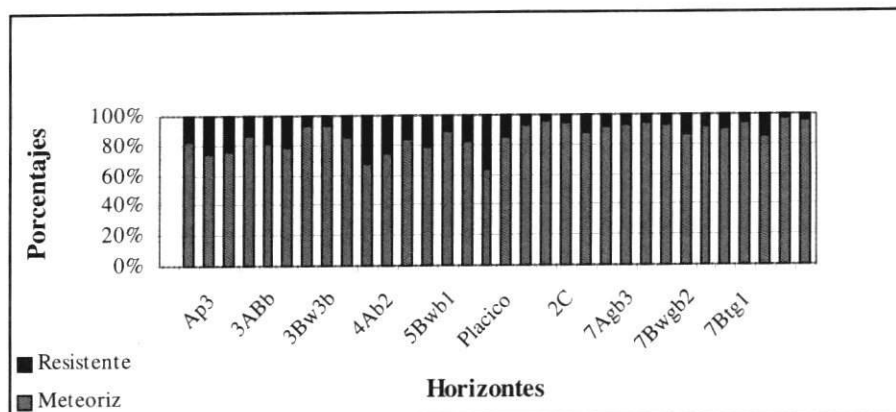


Figura 3 Relación de pedocomponentes inorgánicos meteorizables con respecto a los resistentes

- C están más alterados que los horizontes A, lo cual indica que la secuencia de alteración normal para los suelos —es decir, primero en los horizontes A, luego en los B y por último, en los C— no se da, implicando que el aporte de cenizas volcánicas cambia el orden de alteración por acción de ellas, y como tal se enriquece la “dinámica” pedológica (aportes de ceniza volcánica, influencia de la MO, condiciones ambientales, etc.).
- d. Los mayores contenidos de pedocomponentes resistentes se presentan en los horizontes Ap₂, Ap₃ y 4BA_b de la secuencia El Cedral, en el 5Bwb₂ de la secuencia Salamina, y en el horizonte 7Bwgb₁ de la secuencia Pácora; los menores valores se observan en el horizonte 3Bwb₂ de El Cedral, y 6Agb₂, 7Btg₂ y 7BCg de Pácora.
- e. De los minerales meteorizables el de mayor abundancia es la biotita (32,4% en Pácora, 10,5% en Salamina y 0,58% en El Cedral) pero el de mayor grado de meteorización es el feldespato y la plagioclasa, con contenidos del 25,5% en Salamina, 21,4% en El Cedral y 19% en Pácora; mientras el menos abundante es la epidota, y ésta es la de menor grado de meteorización. Los contenidos de hornblenda son del 18% en Salamina, 14% en El Cedral y 9,7% en Pácora.
- f. De los minerales resistentes, el de mayor abundancia es el ortopiroxeno y es más abundante en la secuencia Pácora, luego en el Cedral y por último en Salamina, con contenidos del 22,52%, 7,95% y 2,7%, respectivamente. El cuarzo está en proporciones del 3,06% en el Cedral, 2,5% en Salamina y 2,4% en Pácora.

Proceso de gleyización

Los términos gley o formación de un gley fueron introducidos en la terminología científica por Visotki, citado por Cairo y Giraldo (1987), quien consideró que en el proceso de formación del gley la función principal la realizan las reducciones del óxido de hierro y del manganeso; sus

transformaciones en compuestos de protóxidos, ocurren con la lixiviación ulterior. La reducción se produce bajo la influencia de las sustancias orgánicas, que se descomponen cuando el acceso del oxígeno del aire es muy difícil o no existe. Durante la formación de gley se produce un gran cambio en la composición y en las propiedades de la parte orgánica y mineral del suelo. Los pedocomponentes orgánicos e inorgánicos sufren diferentes transformaciones complejas durante el proceso y se realiza la destrucción. El proceso de destrucción de los pedocomponentes inorgánicos se produce por la influencia de los compuestos orgánicos activos, con propiedades ácidas, que se acumulan, bajo la influencia de microorganismos. Una de las propiedades más características de formación de gley es la reducción del hierro y del manganeso. Los compuestos de Fe₂O₃ al reducirse se transforman en los compuestos de óxido ferroso (bivalentes), este óxido ferroso reacciona con la sílice y la alúmina, y forma los silicatos secundarios de Fe y Al; tales minerales, como la biotita, que tienen óxido ferroso, son de color grisáceo, azulado, verdoso sucio y se presentan en toda la secuencia Pácora, pero con mayor abundancia en el techo y la base de ésta, véase lamina 9 de la figura 1; los horizontes del suelo donde se acumulan estos minerales se llaman gley. En las secciones delgadas de los suelos puede observarse el color del plasma, el cual es, por lo general, verde manzana anisotrópico; éste, al igual que la mineralogía, estaría indicando las condiciones de óxido-reducción a la cual estuvieron sometidos. Si la humedad no es prolongada, el horizonte continuo de gley puede no formarse, y en su lugar aparecen en el perfil de suelo algunas manchas grisáceas o verde-azulosas, estos horizontes se llaman poco gleyizados, como en los 7Bwgb de Pácora. Durante la formación de gley se originan compuestos orgánicos activos, que tienen propiedades ácidas y componentes móviles de destrucción, y reducción de la parte mineral del suelo. Estos componentes forman diferentes compuestos organominerales que son muy móviles en los horizontes de gley. Los procesos de migración

se desarrollan con mayor fuerza en los suelos de humedad excesiva superficial temporal, en combinación con los flujos descendentes de agua. Particularidad muy singular de los horizontes gley en estos suelos es la presencia de biotita de color verde, altamente meteorizada, y los ortopiroxenos, altamente corroídos.

Proceso de translocación

Este proceso se manifestó con mejor detalle en la secuencia Salamina, véase lamina 10 de la figura 1, el cual se presenta en los horizontes C, en donde muchos componentes, en forma de coloides, son lixiviados hacia los horizontes inferiores a éste, hecho que se observa, dado el enriquecimiento en muchos pedocomponentes que se da en los horizontes C₂ y 2C, como en carbón vegetal, resinas, agregados orgánicos, fragmentos de matriz, vidrio volcánico y fitolitos, principalmente. En la secuencia Pácora, la presencia de los horizontes Bt podría estar indicando la translocación de arcilla desde los horizontes superiores y su posterior enriquecimiento; sin embargo, este aspecto no pudo ser comprobado en las secciones delgadas de suelos realizadas para estos horizontes.

Proceso de quelación

La palabra quelato se deriva del griego y significa pinza o tenaza de cangrejo, químicamente. Es un ligando polidentado que puede ocupar dos o más posiciones alrededor de un solo catión; estos ligandos son comúnmente moléculas orgánicas grandes, que pueden enlazarse temporalmente para sustraer moléculas y dan como resultado una configuración que cataliza los cambios químicos en el sustrato. El más importante efecto de la quelación es la de permitir la disolución congruente de metales polivalentes a valores de pH comunes del suelo. Dentro del rango de pH normales del suelo (pH 4-8) y bajo condiciones de oxidación, los óxidos de Fe y Al parecen forzados a permanecer como residuos insolubles de la meteorización, pero en realidad ellos tienen movilidad limitada mediada por los compuestos quelatantes. En estos

paleosuelos ándicos existe producción masiva de coloides orgánicos, debido a la gran disponibilidad de biomasa, pero también a la ruptura rápida de los ácidos fúlvicos (y otros) producidos, y por ello el Fe y el Al usualmente se precipitan cerca del sitio de meteorización y ayudan a producir, en algunos casos, horizontes plácicos, debido a la alta afinidad de los óxidos de Fe para unirse con la materia orgánica. Los agentes quelatantes, al estar en contacto directo con los materiales volcánicos producen más fácilmente el cambio químico necesario para que se dé la meteorización de éstos.

Proceso de melanización

La melanización es el cambio en el valor del color del suelo y se causa por la adición de materia orgánica; lo más común es que horizontes del suelo ricos en materia orgánica tengan alto grado de melanización, reflejado éste por un valor inferior de 1,7 en el índice melánico (el índice melánico, constituye un indicador importante para explicar el color negro de los horizontes. Los materiales húmicos de mayor complejidad (tipo A) son los determinantes de dicho color, opuestos a los de menor evolución; los primeros, corresponden a los coloides orgánicos de mayor grado de polimerización y tamaño molecular, y los segundos, a los ácidos fúlvicos; en términos de cobertura vegetal, los primeros se asocian con gramíneas y los segundos con bosques, SSS (1998/1999). Dentro de las secuencias estudiadas se encontraron horizontes con índices melánicos inferiores a 1,7, entre ellos los horizontes 4Ab₁, 4Ab₂ y 4Ab₃ de la secuencia El Cedral, y los horizontes 7Agb₁, 7Agb₂ y 7BCg de la secuencia Pácora. Lo que realmente llama la atención es que en horizontes supuestamente ricos en materia orgánica como son los horizontes actuales de la secuencia El Cedral, el valor del índice melánico fue mayor que 1,7, aportando valores para los tres primeros horizontes de 2,2, lo que contradice lo señalado en el párrafo anterior; sin embargo, es en esta secuencia donde se puede observar fácilmente la melanización, ya que es ligeramente más clara que en la secuencia Pácora.

Reconstrucción pedogenética de las secuencias el Cedral, Salamina y Pácora

La reconstrucción del ambiente de formación de los paleosuelos ándicos a partir de todos los datos disponibles y en particular de la evidencia fósil estudiada en los pedocomponentes orgánicos, inorgánicos y mixtos del suelo es bastante complicada, debido a que aunque ellos contienen los rasgos dejados por la pedogénesis sufrida durante la evolución de los suelos, la no existencia de trabajos similares, en pisos altitudinales y ecosistemas parecidos, crea la duda sobre si la interpretación es la correcta; lo importante, entonces, es deducir los eventos pedológicos que estos suelos sufrieron, tomando, como punto de referencia, el estudio de los pedocomponentes fósiles contenidos en ellos y crear entonces, al menos, un precedente. A continuación se presenta una interpretación de los eventos pedológicos diferenciados en cada una de las secuencias y los procesos pedogenéticos dados; al final, se plantea un modelo general de formación de los suelos y paleosuelos ándicos.

Reconstrucción pedogenética de la secuencia El Cedral

La historia pedogenética de esta secuencia se inicia con la caída de por lo menos dos capas de ceniza volcánica (aunque pudieran ser realmente cuatro capas) sobre un suelo preexistente que quedó enterrado. Las capas de ceniza volcánica produjeron el desarrollo de catorce horizontes; los tres más superficiales Ap_1 , Ap_2 y Ap_3 , constituyen el suelo actual, y los otros 11 son suelos enterrados, dos de los cuales son horizontes cambicos (3ABb y 4BAb). El perfil general del suelo lo forman horizontes $Ap-2Ab-3ABb-3Bwb-4BAb-4Ab$, los cuales se desarrollaron bajo régimen de humedad údico, con drenaje favorable, y régimen de temperatura isomésico, con precipitación bien distribuida. Los fenómenos pedogenéticos dominantes en estos suelos son: a) la melanización o humificación de los horizontes localizados en la base y en el techo de la secuen-

cia y b) la andolización, caracterizada por la insolubilización de los pedocomponentes orgánicos, bajos contenidos de amorfos de Al y Si. Como rasgo característico, se registra en la base de la secuencia una discordancia erosional y un horizonte plácico discontinuo. De acuerdo con Jaramillo [6], en la secuencia El Cedral se registra un mejoramiento climático (definido por incrementos considerables en la temperatura y disminución de la pluviosidad), desarrollado bajo bosque andino, con humedad máxima hacia la base y humedad moderada hacia el techo, con ligero calentamiento.

Reconstrucción pedogenética en la secuencia Salamina

La historia pedogenética de esta secuencia se inicia con la caída de, por lo menos, dos capas de ceniza volcánica sobre un suelo preexistente, a partir de las cuales se desarrollaron 7 horizontes de suelo, todos ellos hoy enterrados, que se caracterizan por sus texturas finas, en el techo, y grueso granulares y canto soportados, en la base; ambas separadas por un horizonte plácico reconocible en todo el norte de la cordillera Central. Los suelos de esta secuencia forman horizontes Bwb-Bsh-C y no presenta horizontes Ab; es probable que este horizonte haya sido decapitado por la discordancia erosional registrada en la base de El Cedral, en la cual parte de éste haya quedado como remanente incompleto, embebido dentro de los dos últimos horizontes localizados en la base de El Cedral. Estos suelos se desarrollaron bajo régimen de humedad údico y régimen de temperatura isomésico, con drenaje desde bueno a mal drenado, más limitado que en la secuencia El Cedral; los suelos son pardos, ácidos y humíferos en el techo, y un poco más básicos y menos humíferos en la base. La pedogénesis desarrollada es la andolización con moderados contenidos de amorfos de Al y Si. Las dos capas de esta secuencia están separadas por un horizonte plácico que contiene desmidiáceas del género *Staurostrum* (posiblemente), lo que puede dar a entender que la formación del plácico esté más ligada a cambios en el nivel freático y perío-

dos estacionales del clima (humedad-sequedad) que a la misma diferencia granulométrica registrada entre las dos capas. Los aspectos más característicos de esta secuencia son: a) la existencia de una capa freatomagmática canto-soportada, casi sin disturbar y b) la presencia de un horizonte plácico que es un marcador muy importante para estos suelos, al menos en la parte norte de la cordillera Central. De acuerdo con Jaramillo [6], hacia la base de la secuencia Salamina se registra un leve calentamiento, aunque toda la secuencia representa un tardiglaciador, desarrollado bajo bosque andino en condiciones de alta humedad; hacia el techo se registra leve enfriamiento.

Reconstrucción pedogenética en la secuencia Pácora

La historia paleoecológica de esta secuencia registra dos períodos de intensa lluvia o un diluvio, en la base de toda la secuencia que involucra la Capa T12, y en el techo, involucrando la Capa T14; éste se manifiesta como un drenaje subsuperficial lento y somete el suelo a condiciones hidromórficas y de óxido-reducción. Cesan luego las condiciones de humedad y se registra mejoramiento del drenaje, acompañado de mejoramiento climático, se produce nueva caída de cenizas y las entierra; posteriormente, se dan condiciones de óxido-reducción y se forma el plácico. Los suelos de esta secuencia se desarrollaron en régimen de humedad ácuico, y régimen de temperatura isofrígido. El drenaje varía desde imperfecto hasta malo, el proceso pedogenético característico es la andolización con hidromorfismo desaturado y gley oxidado, la hidromorfía se evidencia en todos los horizontes, siendo más intensa en los del techo y la base, y ello hace que éstos aparezcan gleyzados, de color gris verdoso moteado; de donde se deduce el drenaje interno y externo malo, así como el movimiento de la capa freática, que permaneció mucho tiempo colgada, tanto en la parte inferior como en la parte superior del suelo, expresándose en horizontes de óxido-reducción del Fe. Se agrega la presencia de un horizonte plácico entre las capas T14 y T12, delgado y a veces duro,

marcando el contacto entre dos capas de granulometría y permeabilidad diferentes, ligada a la amplitud del desplazamiento de esta capa freática. En toda la secuencia se registran altos contenidos de amorfos de Si y Al; dos capas de ceniza volcánica dan desarrollo a once horizontes que forman secuencias Agb-Bwgb-Btg-BCg; los Bt estarían indicando clima estacional no muy seco que evolucionó bajo condiciones de páramo. Asociada a los horizontes Bt se encuentra una notable discordancia erosiva, que alcanzó a producir la inversión del relieve localmente. Cronológicamente, estos horizontes marcan el inicio del holoceno; durante la depositación de toda la secuencia las erupciones fueron de tipo magmático, y al parecer de alta temperatura, por la presencia ocasional de núcleos muy consolidados en los horizontes oliva, de colores grisáceos litocrómicos y ásperos al tacto. De acuerdo con Jaramillo A. [6], en la secuencia Pácora se registra un período de glaciación caracterizado, en su base y techo, por la disminución de la temperatura, marcada condición de humedad y hacia el techo se registra el avance del glaciador; el clima es frío estacional y estas condiciones afectan toda la secuencia, hecho por el cual el color original de las capas vs horizontes se torna un poco grisáceo, que es el color marcador de dichas condiciones.

Aspectos pedogenéticos generales

- a. En los horizontes 3ABb, 3Bwb₁, 4Ab₁ y 4Ab₂, de la secuencia El Cedral, y en los horizontes 5Bwb₃ y 7Btg₁, de la secuencia Pácora, se registraron máximos de humedad, dada la cantidad de fitolitos presentes y su grado de hidratación. En esta última secuencia, casi el 95% de los fitolitos son hidratados, lo que corresponde con el período glacial registrado. En la secuencia Salamina, no sólo los contenidos son bajos sino que es muy posible que éstos correspondan a material lixiviado de los horizontes superiores, ya que éste es un material altamente poroso y no retiene muchos finos.

- b. Evidencias de procesos pedogenéticos ocurridos durante la formación de estos paleosuelos ándicos, son la formación de anillos de hidratación, la presencia de corrosión superficial y la formación de cavidades de corrosión por la acción de grumos orgánicos; estos fenómenos constituyen una clara respuesta a las condiciones bajo las cuales estuvo sometido el suelo durante su formación y su posterior enterramiento y fosilización.
- c. Presencia simultánea de abundante materia orgánica y fitolitos, como en el caso de la muestra 3Abb; en este caso, el ópalo es la primera fuente de sílice para la pedogénesis, ya que en dichas condiciones la corrosión observada es muy intensa en los fitolitos y débil en los feldespatos y plagioclasas, mientras que otros pedocomponentes, como el vidrio volcánico, no presentan este proceso; en los minerales ferromagnesianos es apenas evidente tal fenómeno. Estos fenómenos, muy ligados a la materia orgánica, parecen dar la razón a quienes opinan que el ambiente de meteorización en el suelo, pedometeorización, es bien diferente a la meteorización geológica, la cual ocurre sin la presencia de dichos residuos y lixiviados orgánicos. Lo anterior podría indicar, entonces, que la secuencia de alteración para estos pedocomponentes podría ser: fitolitos incoloros y coloreados > fragmentos de matriz > feldespatos y plagioclasas > ferromagnesianos > vidrio volcánico, etc.
- d. Ausencia de argilanes y otros cutanes. Se deduce que los procesos de translocación de arcillas son, o han sido, muy escasos.
- e. Las glébulas, especialmente como nódulos de Fe y Mn, y en algunos casos como manchas, películas o recubrimientos, constituyen el fenómeno pedológico más conspicuo; los nódulos de Mn indican cambios en las condiciones de óxido-reducción, asociados seguramente con cambios climáticos.
- f. El Al es el elemento más dinámico de estos paleosuelos y su extracción selectiva por el pirofosfato de sodio, como lo reporta Arango [4], es directamente proporcional al contenido de carbón; por su parte, éste disminuye con la profundidad y la mayor edad de las secuencias. El Fe se concentra en los horizontes plácicos, mediante procesos recientes y que se suceden en la actualidad.
- g. En la secuencia Pácora son evidentes las características redoximórficas asociadas con la humedad y por efecto de la reducción y oxidación de los compuestos de hierro y manganeso en el suelo, después de saturación con agua y desaturación, respectivamente.
- h. Presencia de por lo menos dos horizontes plácicos, uno en la base del horizonte 5Bwb₃, de la secuencia El Cedral, y otro en la base del horizonte 6Agb₂, de la secuencia Pácora. Estos horizontes plácicos son una mezcla rica en hierro y materia orgánica y otros materiales. Se presenta, comúnmente, como concentraciones de color rojo ladrillo que forman patrones en placa, poligonales o reticulados que cambian irreversiblemente a una placa dura de mineral de hierro o de agregados irregulares, con humedecimiento y secado repetidos, especialmente cuando está expuesta a la intemperie. Generalmente, este horizonte plácico se forma en un horizonte saturado con agua durante algún tiempo en el año; es firme cuando el contenido de humedad del suelo está cercano a la capacidad de campo, y duro cuando el contenido de humedad está por debajo del punto de sequedad. El plácico no se endurece irreversiblemente como resultado de un solo ciclo de humedecimiento y secado; después de un solo secado, puede rehumedecerse y dispersarse.
- i. En las tres secuencias se registran varias discontinuidades, que señalan diferencias en el material a partir del cual se han formado los horizontes o una diferencia significativa en la edad (indicada por el sufijo b).
- j. La melanización de los horizontes actuales y de los paleosuelos de la secuencia El Cedral

(4Ab₁, 4Ab₂, 4Ab₃) y en la secuencia Pácora (7Agb₁, 7Agb₂) asociada con ácidos húmicos y fúlvicos, altos contenidos de nitrógeno [4], y con la precipitación precoz de compuestos liginicos oxidados, bajo la forma de sustancias negras.

- k. La gleyzación que es la formación de compuestos ferrosos (reducción) promovidos por los cambios en el potencial de óxido-reducción.

Modelo genético para las secuencias El Cedral y Salamina

En este capítulo se han presentado los principales aspectos de la génesis de los paleosuelos ándicos y las respuestas dinámicas de los pedocomponentes a los procesos, caracterizando la pedogénesis y los fenómenos pedológicos más determinativos; con esta base se trata de sintetizar e integrar las ideas comentadas, por medio de la discusión de un modelo genético para los paleosuelos y suelos de las secuencias El Cedral y Salamina. No se hace un modelo genético para Pácora, debido a que esta secuencia es mucho más compleja y a pesar de que en la vereda La Lana, del municipio de Santa Rosa, en Antioquia, se la encuentra bajo condiciones actuales; la falta de un estudio mucho más completo impide elaborar un modelo de génesis para esta secuencia. Sin embargo, con el modelo planteado aquí, se busca establecer el nexo con los aspectos pragmáticos derivados del modelo, de tal manera que sirva de punto de unión con otras obras científicas dedicadas a aplicar el conocimiento deducido de la génesis y evolución de estos suelos ándicos.

Johnson y Watson-Stenger (1987) plantean que el desarrollo del esquema de formación de suelos se fortaleció durante la primera mitad del siglo XIX, con la conceptualización de la pedogénesis, mediante la aproximación funcional factorial de Jenny (1941), cuyo objetivo radicó en cuantificar estas relaciones a partir de cuatro factores del medio: clima (cl), organismos (o), relieve (r), material parental (mp) y algunos otros

no especificados, más la dimensión temporal (t); es decir S: f(cl, o, r, mp, t, ...). En este modelo, los cinco factores de formación definen el estado e historia del suelo; por ello, son considerados factores de estado. Este modelo y otros más desarrollados por otros investigadores de la ciencia del suelo, constituyen la base para estudiar las causas de la evolución de los suelos, y, mediante ellos, la pedología ha evolucionado hacia modelos de diferente formulación para explicar la génesis de los suelos y paleosuelos ándicos de las secuencias El Cedral y Salamina.

La génesis para estos suelos y paleosuelos se explica así, partiendo de dos componentes principales: material orgánico fresco y material inorgánico fresco (material parental de cenizas volcánicas); ambos, dispuestos sobre un relieve preexistente, formado por colinas onduladas, suavemente redondeadas y sometidas a condiciones climáticas caracterizadas por altas precipitaciones y bajas temperaturas. La acción de los organismos y el tiempo inicia varios procesos formadores de suelos, siendo el más importante el de humificación y el de meteorización.

En ambos procesos tienen acción, principalmente, los organismos descomponedores que se encargan de destruir la materia orgánica fresca a través del fraccionamiento, el ataque microbiano, la acción de las enzimas, el rompimiento mecánico y estructural de los tejidos, la actividad lítica bacteriana y las soluciones del suelo; la humificación es ayudada por la humedad, el pH, la vegetación y las condiciones enzimáticas. Entonces se forman coloides orgánicos, materiales amorfos y complejos orgánicos; otros productos de este proceso de humificación son los ácidos húmicos y fúlvicos, que son lixiviados o asimilados por el suelo e integrados como alimento a la planta.

Para el caso del material inorgánico fresco, el proceso de meteorización es el que entra a descomponer y desintegrar, química y físicamente, los pedocomponentes inorgánicos presentes en los suelos y que no se encuentran en equilibrio en las condiciones de temperatura, humedad, etc.; principalmente los fragmentos de matriz, los

feldespatos, las hornblendas, la biotita, los vidrios volcánicos, los ferromagnesianos y otros minerales presentes. En el proceso, ocurren otros específicos, como la óxido-reducción, hidrólisis, hidratación, disolución, etc. Como resultado de esta meteorización se forman dos productos: un complejo mineral y un complejo amorfo de Si-Al y Si-Fe; este complejo amorfo es producido, en primera instancia, por la meteorización de los fragmentos de matriz, el feldespato, la plagioclasa y los fitolitos esencialmente, y, en menor grado, el vidrio volcánico. Hay aportes de Fe, como producto de la meteorización de la biotita y de los ferromagnesianos, pero son esencialmente los fragmentos de matriz, los feldespatos y los fitolitos los que hacen los mayores aportes de sílice al sistema, para que se forme el amorfo de Si-Al.

En el presente estudio se encontró que los vidrios volcánicos no participan de una manera tan activa, como se ha expresado en la literatura; ellos se meteorizan, pero a una tasa muy baja, que no permite la producción de la alófana a la velocidad que sí se produce con los otros materiales. De todos éstos, son los fragmentos de matriz los que mayor aporte hacen para su formación. El complejo orgánico, producido por la descomposición y la humificación, y el complejo mineral, producido por la meteorización, se unen, y, mediante un proceso conocido como quelación, forman el complejo organomineral de Si, Al y Fe que, junto con los materiales amorfos, también ricos en estos tres elementos (Si, Al y Fe), forman un gel amorfo de Al, Si y Fe que se conoce como alófana; cuando ésta está enriquecida en Si-Al se reconoce como imogolita, y cuando el enriquecimiento es en Al-Fe se conoce como ferrihidrita. Otros procesos específicos como el de translocación, gleyzación, melanización, etc., entran a actuar en los suelos una vez éstos se forman, pero son esencialmente los de acumulación, descomposición, humificación y meteorización los responsables de la formación de estos paleosuelos ándicos.

Referencias

1. Jaramillo D., F. *Efecto del secado al aire de las muestras sobre la extracción selectiva de Fe y Al activos en andisoles*. 2000. p. 19. En prensa.
2. _____. *Efecto de la extracción con mezclas de solventes en andisoles repelentes al agua de Antioquia*. 2000. p. 14. En prensa.
3. _____. *Los suelos derivados de los materiales piroclásticos de la secuencia El Cedral, en el altiplano de San Félix, Salamina, Caldas*. 2000. p. 28. En prensa.
4. Arango, G. *Caracterización química y pedogénesis de suelos y paleosuelos derivados de cenizas volcánicas en el norte de la Cordillera Central de Colombia*. Trabajo de Grado, Ingeniera Química. Universidad de Antioquia. Departamento de Química. 1993. p. 141.
5. Flórez, M. T. y Parra S., L. N. "Características texturales en los componentes de las tefras del norte de la Cordillera Central de Colombia". En: *Boletín Ciencias de la Tierra*. No. 11. 1992. pp. 81-104.
6. Jaramillo J., A. *Registro palinológico de las variaciones climáticas del cuaternario en andisoles de la Cordillera Central Colombiana*. Trabajo de Grado. Geólogo. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 1994. p. 138.
7. Benavides, G. "Determinación de las propiedades ándicas en algunos suelos de Colombia". En: *Revista Suelos Ecuatoriales*. 1987. pp. 332-337.
8. Boul, S. *et al. Soil genesis and classification*. 4th. ed. Iowa State Univ. Press. Ames. 1997.
9. Flórez M., M.T. *Génesis de suelos y paleosuelos Ándicos a partir del estudio de pedocomponentes*. Tesis de Maestría en Geomorfología y Suelos. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 2000. p. 189.
10. _____. *Suelos derivados de ceniza volcánica, Sonsón, La Unión y San Diego*. Trabajo de Grado. Ingeniera Geóloga. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 1987. p. 287.
11. _____. "Fitolitos en los paleosuelos Ándicos altoandinos, San Félix, departamento de Caldas". En: *Silicofósiles altoandinos*. Colciencias. Universidad Nacional. Universidad de Antioquia. 1999. pp. 45-56.
12. Fölster, H. *et al.* "Late Quaternary paleosols in the western and Central Cordillera or Colombia". En: *Paleogeography, paleoclimatology and paleoecology* 21. 1977. pp. 245-264.

13. González, L. *et al.* "Lito y pedostratigrafía preliminar para las tefras del norte de la Cordillera Central Colombiana". En: *Boletín Ciencias de la Tierra*. Vol. 10. 1991. pp. 41-75.
14. _____. "Andisoles fósiles en el norte de Colombia". En: *Revista Suelos Ecuatoriales*. Vol. 23 (1, 2). 1993. pp. 31-44.
15. Hooghiemstra, H. *The quaternary of Colombia. vegetational and climate history of the high plain of Bogotá, Colombia. A continuous record of the last 3.5 million year.* Germany, 1984. p. 368.
16. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC. *Suelos de Colombia: origen, evolución, clasificación, distribución y uso.* Santafé de Bogotá, 1995. pp. 552-565.
17. Malagon, D. *et al.* *Suelos de Colombia: origen, evolución, clasificación, distribución y uso.* IGAC. Santafé de Bogotá, 1995. p. 632.
18. _____. *Evolución de suelos en el páramo andino.* SIDITA. Mérida, Venezuela. 1982.
19. _____. Pulido, C. y Llinas, R. "Paleosuelos del piso altoandino en la región montañosa circundante a Bogotá". En: *Revista Investigación, IGAC.* Subdirección Agropecuaria. Vol. 2. No. 2. Bogotá, 1990. p. 198.
20. _____. "Génesis y taxonomía de los Andisoles colombianos". En: *Revista Investigaciones, IGAC.* Subdirección agropecuaria. Vol. 3. No. 1. Bogotá, 1991. p. 118.
21. _____. "Génesis y caracterización de formaciones volcánicas endurecidas en paleosuelos de la sabana de Bogotá - Colombia". En: *Suelos volcánicos endurecidos.* TERRA. Vol. 10. México, 1992. pp. 100-106.
22. Nanzyo, M. *et al.* "Chemical characteristics of volcanic ash soils". In: *Vulcanic ash soils: Genesis, properties and utilization. Developments in soil science 21.* Elsevier. Amsterdam. 1993. pp. 145-187.