**EVIDENCIAS MACRO Y MICROMORFOLÓGICAS DE PALEOSUELOS EN EL DESIERTO DE LA TATACOA Y SU VARIACIÓN SINCRÓNICA.**

**MACRO AND MICROMORPHOLOGICAL EVIDENCE OF THE PALEOSUELOS OF THE TATACOA DESERT AND ITS SYNCHRONIC VARIATION.**

**PEDOGENESIS EN LOS PALEOSUELOS DEL DESIERTO DE LA TATACOA.**

María Teresa Flórez-Molina[[1]](#footnote-1), Luis Norberto Parra-Sánchez[[2]](#footnote-2), Daniel Francisco Jaramillo-Jaramillo[[3]](#footnote-3), y José María Jaramillo-Mejía[[4]](#footnote-4)

**RESUMEN**

Existen paleosuelos al interior de las secuencias estratigráficas conocidas como “Capas rojas” del desierto de La Tatacoa. A nivel macro y micromorfológico se observaron para todos los paleosuelos de las "arenas ferruginosas" y la "capa roja inferior" las siguientes características; horizontes Bt de color rojo y de constitución arcillosa con estructura en bloques angulares. Todos estos paleosuelos también tienen un bajo contenido de materia orgánica, cutanes y slickensides y muestran claras evidencias de translocación de óxidos de hierro y de manganeso y carbonatos de calcio.

Algunas características pedogenéticas muestran una fuerte variabilidad espacial a lo largo de las secuencias rojas de este estudio. El espesor y la posición de los paleo-suelos respecto a los lechos líticos son variantes comunes, también los horizontes Bt pueden ser Bt, Btn, Btkn, Bth y Bts y se pueden encontrar paleosuelos con solo uno o muchos de estos horizontes.

Algunos procesos pedogénicos bien documentados aquí como iluviación, lessivaje, mineralización de la materia orgánica, solodización, rubefacción, fersialitización, carbonatación, adensamiento y erosión hídrica, son una fuerte evidencia de la evolución de estos paleo-suelos bajo el control de un clima estacional contrastado con una humedad seca bien marcada y de su accionar sobre sedimentos clásticos ricos en minerales con cationes básicos y hierro.

Se propone la liberación de hierro desde los minerales primarios y su difusión dentro de la matriz del material geológico con su posterior oxidación, como el mecanismo responsable del color dominante tanto de las capas rojas como de los paleosuelos del desierto de La Tatacoa.

**Palabras clave:** *Paleosuelos, variación sincrónica, pedogenesis, macro y micromorfología, Capas rojas inferiores, Capas ferruginosas, desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia.*

**ABSTRACT**

There are paleosols within the stratigraphic sequences known as red layers of the La Tatacoa desert. At the macro and micromorphological level they were observed for all the paleosols of the "Ferruginous sands" and the "lower red bed" the following characteristics; Bt horizons of red color, clayed constitution and angled blocky structure. All these paleosoils also have low organic matter content, cutans and slickensides and clear evidences of translocation of iron and manganese oxides and calcium carbonates.

Some pedogenetic characteristic shows strong spatial variability along the red sequences of this work. Paleo-soils thickness and position respect to the lithic beds are common variants, also the Bt horizonts can be bt, btn, btkn, bth and bts and can be found paleosoils with only one or many of these horizonts.

Pedogenetic processes well documented here such as illuviation, lessivaje, mineralization of organic matter, solodization, flushing, fersialitization, carbonation, aeration and water erosion, are strong evidence of the evolution of these paleo-soils under the control of a dry, seasonal and humidity contrasted climate, and its actioning over fine clastic sediments rich in minerals with basic cations and iron.

It is proposed here that the release of iron from the primary minerals and their diffusion within the matrix of the geological material with its subsequent oxidation, as the mechanism responsible for the dominant color of both the red layers and the paleosols of the desert of La Tatacoa.

***Palabras clave:*** *Paleosuelos, variación sincrónica, pedogenesis, macro y micromorfología, Capas rojas inferiores, Capas ferruginosas, desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia.*

**INTRODUCCIÓN**

En los recubrimientos superficiales de algunos paisajes terrestres de Colombia se han detectado paleosuelos que se han constituido en un valioso recurso científico, especialmente en la tefroestratigrafía de sus cordilleras (Pulido et al., 1990; González et al., 1993; Flórez, 2000; Mantilla et al., 2011; Parra, 2016). Estos materiales son excelentes indicadores de los biomas del pasado, ya que son especialmente sensibles a la temperatura y la precipitación, al tipo de vegetación y a las condiciones de drenaje que existían en la época de su formación (Herd, 1982; Thouret et al., 1985; Salomons, 1989).

En el desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia, se encuentran rocas sedimentarias clásticas, del Mioceno Superior, que alternan con tres conjuntos de capas rojizas, de diferentes edades, que fueron nominadas como Upper red beds, Lower red beds y Ferruginous sandstone,y cartografiadas, en detalle, por Fields y Henao (1949), Henao (1950) y Fields (1959). Dentro de las capas rojizas se han identificado paleosuelos formados bajo climas estacionales contrastados hasta áridos, en paleorelieves colinados de baja altitud y planicies aluviales (Guerrero, 1994; Flórez et al., 2013; Parra, 2016), aunque Stirton (1953) negó su existencia.

Salazar et al. (2017) y Sánchez et al. (2017) trabajaron los paleosuleos del Upper red beds del Miembro Cerro Colorado y mediante climofunciones calcularon la precipitación media anual de 1300±181mm/año y una temperatura media anual entre 20±0.6 ºC. Estos autores indican que la arcilla predominante en estos paleosuelos es la esmectita, presente en un 50%, seguido de la dickita y caolinita, cada una con un 22%, y la ilita con un 6%.

Flórez et al. (2013), en las capas rojas del desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia, reconocieron dos secuencias de paleosuelos que llamaron: Superior e Inferior. La Secuencia Superior tuvo un espesor de 16.15 m y estuvo compuesta por tres fragmentos de paleosuelos, mientras que la Secuencia Inferior, con 14.5 metros, también incluyó tres fragmentos. La característica más sobresaliente de los paleosuelos encontrados en la Secuencia Inferior es la coloración parda rojiza y parda rojiza oscura, mucho más intensa que en los paleosuelos de la Secuencia Superior.

En este artículo se describe la pedoestratigrafía de las Capas ferruginosas, para complementar la de las otras capas rojas publicada por Flórez et al. (2013), se realiza un análisis de la variación sincrónica de las capas rojas encontradas en el desierto de La Tatacoa y se presentan evidencias macro y micromorfológicas de la presencia de paleosuelos en las mismas. Con la información anterior se tratará de establecer las condiciones de formación de los paleosuelos encontrados y su variación sincrónica.

**MATERIALES Y MÉTODOS**

**Descripción del área de estudio**. La zona de interés se localiza en el desierto de La Tatacoa, en los municipios de Baraya y Villavieja, Huila (Figura 1). De acuerdo con Universidad Sur Colombiana, USCO, (2005), el clima es semiárido ecuatorial y corresponde a las zonas de vida bosque seco tropical (bs-T) y bosque muy seco tropical (bms-T).

|  |
| --- |
|  |
|  |  |  |

**Figura 1.** Localización de las capas rojas en el desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia (imagen de Google Earth) y aspecto general de los sitios donde se ubicaron las secciones tipo de los paleosuelos en cada una de ellas (Fotos de los autores).

**Trabajo de campo**. En campo se hicieron recorridos a lo largo de las capas rojas detectadas y en ellas se seleccionaron varios sitios donde se describieron sus características según el protocolo establecido por Schoeneberger et al. (2002), complementándola con las guías y procedimientos de Retallack (1998, 2001), Kraus (1999) y Nettleton et al. (2000). Los suelos y paleosuelos encontrados se clasificaron, a nivel de subgrupo, según el Sistema Taxonómico de Clasificación de Suelos del USDA (Soil Survey Staff, SSS, 2014). Se tomaron fotografías y se realizaron los diagramas pedoestratigráficos respectivos de todo lo descrito. Finalmente, se muestreo el suelo para la caracterización detallada de los materiales mediante análisis de laboratorio: determinaciones físico-químicas, mineralogía y micromorfología.

**Propiedades evaluadas.** A cada material con potencial para definirlo como paleosuelo se le hicieron estudios específicos como:

* *Procesamientos en seco.* Una parte húmeda, previamente pesada, de cada submuestra fue secada al aire sobre una superficie de porcelana en un ambiente limpio y sin exceder los 25°C. En cada submuestra se determinaron las pérdidas de humedad, las perdidas por calcinación a 550°C, el contenido de Carbono Orgánico Total y se le realizó la caracterización, al estereoscopio, de los macrocomponentes del suelo.
* *Mineralogía.* Mediante microscopia electrónica de barrido (MEB) se evaluó la morfología de las partículas en un equipo Jeol, modelo JSM-6300. Las muestras en polvo fueron colocadas en porta muestras y recubiertas previamente con oro en un equipo provisto para ello, modelo Desk II. Se trabajó a 20 Kv, a igual distancia de trabajo, y con acercamientos de 5000, 2500 y 1000X.La caracterización mineralógica de los paleosuelos muestreados se realizó en el Laboratorio GMAS SAS, mediante difracción de rayos X, con un Difractómetro de Rayos X Bruker D8 Advance Serie I, tanto en la fracción arcilla como en un preparado en polvo impalpable del suelo total a los cuales se les adicionó un 5%, en peso, de espato de fluorita como estándar. A la fracción arcilla se le aplicaron los tratamientos de glicolado y calentado, obteniéndose tres resultados por muestra (muestra secada al aire, muestra calentada a 550°C y muestra tratada con Ethylen glicol).
* *Análisis micromorfológico.* Para el análisis micromorfológico se tomaron muestras, en cada horizonte, con un cilindro biselado de 5 cm de diámetro por 10 cm de altura que luego se cubrió con parafina por ambos lados marcando previamente el techo y la base, con el fin de que estos no perdieran humedad. Se guardaron en bolsa plástica y se enviaron al Laboratorio de Suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) en Bogotá donde realizaron las secciones delgadas de suelos. Las placas pulidas se observaron en un microscopio óptico de luz polarizada Olympus y se fotografiaron barriendo su mayor área. Las descripciones comprendieron los componentes, la matriz, sus relaciones, los vacíos, color, y características dominantes.
* *Análisis de pedocomponentes.* El análisis consiste en la identificación y cuantificación de asociaciones de componentes microscópicos orgánicos, inorgánicos o biominerales presentes en el suelo, los cuales pueden ser empleados en la interpretación de condiciones ambientales específicas. Estos componentes, en conjunto, representan un registro integral de los diversos agentes y procesos climáticos, geológicos, edáficos y biológicos que intervienen en el contexto de evolución del suelo. Una porción de la muestra húmeda fue dispersada y fraccionada para obtener las partículas entre 100 y 10 micrómetros que fueron clasificadas y contadas en un microscopio petrográfico.

**Índices pedológicos.** Se calcularon algunos índices que se relacionan con el grado de evolución de los suelos siguiendo la metodología planteada por Sedov et al. (2001, 2009).

* *Índice de Meteorización.* A los paleosuelos de las secciones tipo se les calculó el índice de meteorización, con base en la ecuación [1] de Parker (1970), en la que se considera la movilización de Na+, K+, Ca2+ y Mg2+.

WIP = (Na+/0.35 + Mg 2+/0.9 + K+/0.25 + Ca2+/0.7) % [1]

El WIP, conocido como Índice de Meteorización de Parker, refleja la probabilidad que posee un elemento de ser movilizado en el proceso de meteorización y tiene un rango que varía entre 0 a 100: valores de WIP cercanos a 0 indican mayor meteorización y cercanos a 100 menor efecto de la meteorización.

* *Índice de la relación limo/arcilla.* Se basa en el supuesto de que la fracción de limo de los paleosuelos consiste principalmente de minerales intemperizables y que la fracción de arcilla representa el material secundario derivado del intemperismo del limo. En esta relación, valores < 0.15 caracterizan paleosuelos altamente intemperizados, bien desarrollados y generalmente muy antiguos, formados bajo condiciones de alta estabilidad del paisaje. En contraste, los valores > 2 son indicativos de un reducido intemperismo y una escasa evolución del paleosuelo (Young, 1976; Van Wambeke, 1991).
* *Índice de la relación hierro extraído por oxalato (Feo), hierro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato (Fed): (Feo/Fed).* Los valores obtenidos al calcular este índice indican tanto el grado de intemperismo de los minerales primarios presentes en los paleosuelos, como las condiciones ambientales de sitio en las que se produjo (Shoji et al., 1993). Los valores altos de la relación Feo/Fed, según Malucelli et al. (1999), representan una baja cristalinidad de los compuestos de hierro y, consecuentemente, un porcentaje alto de amorfos, lo cual es diagnóstico para suelos que no han alcanzado una madurez evolutiva.

**Análisis sincrónico.** Una vez definida la sección tipo en cada capa roja se realizó un análisis sincrónico en ellas considerando aspectos como variación en el espesor, desarrollo y estabilidad pedogenética, el grado de intemperismo de los minerales primarios y las condiciones ambientales de sitio en las que se formaron.

# RESULTADOS

**PEDOESTRATIGRAFÍA DE LOS PALEOSUELOS EN LA CAPA FERRUGINOSA**

En la capa ferruginosadel desierto de La Tatacoase pueden reconocer tres horizontes de un paleosuelo que subyace una discordancia erosional. El paleosuelo descansa sobre una capa lítica de limos, muy dura, de color amarillo pálido. Los horizontes del paleosuelo son fuertemente arcillosos y alcalinos, tienen muy bajo contenido de materia orgánica, alto contenido de bases y de fósforo, alta capacidad de intercambio catiónico efectiva; no son deficientes en elementos menores y son sódicos. La sección tipo de esta unidad se localiza a 500 metros de la vía que conduce del observatorio a “Los Pozos”, margen izquierda, en las coordenadas X: 03°14´18.5”, Y: 075°10´33.6” (Figuras 1 y 2).

**Figura 2.** Localización, sitio de la sección tipo y pedoestratigrafía de las capa ferruginosaen el desierto de La Tatacoa. Huila, Colombia.

C 0.0 – 0.94 m; capa lítica arcillosa, color 5YR5/8 (rojo amarillento) con 20% de color 5YR6/1 (gris) presente como concentraciones filamentosas de arcilla que rellenan grietas y fisuras. Sin estructura (masiva) y muy dura; plástica y pegajosa. Límite abrupto ondulado.

2C 0.94 – 1.07 m; capa lítica limo arcillosa, color 5YR5/8 (rojo amarillento) con 30% de color 5YR6/1 (gris) presente como concentraciones filamentosas de arcilla que rellenan grietas y fisuras. Sin estructura (masiva); dura; plástica, ligeramente pegajosa; con muchos poros finos y medios y límite abrupto irregular.

3Btn 1.07 – 1.36 m; color rojo (2.5YR4/6); arcilloso; estructura en bloques subangulares medios, fuertes; duro, plástico, pegajoso; muchos argilanes continuos, prominentes; pocos poros y raíces finos; presenta algunas grietas verticales. pH 8.5; débil reacción al HCl y al H2O2; algunos carbonatos concentrados en placas delgadas de hasta 1 mm. Límite gradual plano.

3Btknss1 1.36 – 1.86 m; color pardo rojizo (2.5YR4/4); arcilloso; estructura en bloques subangulares medios, fuertes; plástico y pegajoso; comunes argilanes continuos, definidos; pocos poros y raíces finos. Presentes slickensides estriados, bien definidos y grietas verticales. pH 8.0; fuerte reacción al HCl y al H2O2; abundantes recubrimientos de manganeso. Límite gradual plano.

3Btknss2 1.86 – 2.16 m; color pardo rojizo (5YR4/4); arcilloso; estructura en bloques subangulares medios, fuertes; plástico y pegajoso; frecuentes manchas de óxidos de hierro y comunes argilanes continuos y definidos; pocos poros y raíces finos. Presentes slickensides estriados, bien definidos y grietas verticales. pH 8.0; fuerte reacción al HCl y al H2O2. Límite abrupto plano.

4C 2.16 – 3.10 m; capa lítica limosa color 10YR6/6 (amarillo parduzco). Sin estructura (masiva), muy dura; ligeramente plástica, ligeramente pegajosa.

Por tratarse de sedimentos, las capas de este depósito pueden considerarse como un continuum geo-genético y la similitud morfológica, físico-química y mineralógica entre los horizontes del paleosuelo (Tabla 1, aquí se relacionan sus propiedades físico-químicas y la mineralogía de las arcillas de sus horizontes, lo que permite pensar que se trata de un solo suelo con tres horizontes).

**Tabla 1.** Propiedades físico-químicas\* y contenido mineralógico\*\* del paleosuelo en la sección tipo de las Capas ferruginosas del desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia.

.

No hay diferencias marcadas que puedan sugerir diferentes pedogénesis en cada horizonte. Las diferencias anotadas para el segundo horizonte (3Btknss1) pueden estar relacionadas con un mayor tiempo de exposición de éste a las condiciones ambientales. Considerando un solo paleosuelo con tres horizontes su clasificación es Sodic Haplotorrerts por los muy bajos contenidos de materia orgánica y los altos contenidos de bases (ambiente más seco que ústico).

Los tres horizontes de la secuencia 3Btn-3Btknss1-3Btknss2 tuvieron un mismo material parental, de origen sedimentario, rico en micas y feldespatos que produjeron arcilla por meteorización y pedogénesis, bajo un clima cálido y seco, fuertemente contrastante en humedad.

Las características más sobresalientes de este paleosuelo son la coloración roja; marcada por colores entre pardo rojizo y pardo rojizo oscuro, la textura arcillosa con estructura en bloques angulares; la presencia de frecuentes manchas de óxidos de hierro y comunes argilanes continuos, así como de slickensides bien definidos y grietas verticales.

**ÍNDICES PEDOLÓGICOS**

En la Tabla 2 se presentan los índices pedológicos hallados para los paleosuelos de las capas rojas descritas en el desierto de La Tatacoa. Los índices de las Secuencias Superior e Inferior se establecieron con la información publicada por Flórez et al. (2013).

Para estos paleosuelos los valores de WIP son relativamente altos, aunque con una amplia variabilidad, indicativos de una meteorización moderada. Una situación similar indican los valores de la relación L/Ar. Se presentan paleosuelos “más meteorizados” subyacidos por paleosuelos “menos meteorizados”.

Los mayores valores de WIP se dieron en el paleosuelo de la capa ferruginosa, siendo los suelos con menor grado de evolución, lo que puede estar mostrando que los tiempos de exposición al ambiente entre la depositación de las capas de sedimentos que los originaron fueron muy cortos y no permitieron una meteorización intensa de ellos, así como que el ambiente durante su sedimentación fue demasiado seco (régimen de humedad Tórrico) inhibiendo, igualmente, su alteración.

**Tabla 2.** Índices pedológicos de los paleosuelos de las capas rojas del desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia*.*

La variación de la meteorización en los tres primeros horizontes de la Secuencia Superior es normal y se observa una inconsistencia en el grado de meteorización de ellos con respecto al del horizonte 7Btn, menos meteorizado, lo que podría estar implicando que entre el 5Btn y el 7Btn hay una discordancia erosional o que el 7Btn fue sepultado rápidamente impidiendo su evolución pedológica. En los paleosuelos de la Secuencia Inferior, así como en los de la capa ferruginosa, se observa que el grado de meteorización está invertido con respecto al orden observado en la Secuencia Superior, lo que se podría indicar que los tiempos de exposición de los suelos al ambiente fueron menores en los horizontes más profundos.

Con base en las observaciones realizadas y en los resultados obtenidos puede decirse que:

* Todos los fragmentos de paleosuelos se desarrollaron de materiales parentales arcillosos o, por lo menos, de materiales que produjeron grandes cantidades de arcilla por meteorización y pedogénesis.
* El clima dominante en la evolución de estos suelos corresponde a uno seco y muy contrastado en humedad.
* Todos los paleosuelos están separados entre sí por capas de arena o de limo que implican alteraciones en el comportamiento hídrico en la cuenca y, por ende, en la dinámica sedimentaria en el sitio. Estas alteraciones pudieron originarse por cambios climáticos regionales o por cambios en el nivel de base de la cuenca y también pueden ser responsables, por lo menos en parte, de la intensa erosión que se ha dado en la zona durante todo el tiempo.
* Todos los paleosuelos presentan horizontes argílicos que requieren para su formación contrastes de humedad, estabilidad geomorfológica y condiciones de dispersión de coloides que permitan su movilización y precipitación dentro del suelo (Pulido et al., 1990; Malagón et al., 1995; Buol et al., 2010 y SSS, 1999).
* El espesor que se consigue sumando todos los horizontes argílicos descritos (20.36 m), implica que se necesitaron muchos milenios para tener las secuencias analizadas. A esto hay que adicionarle la parte de los suelos y otros materiales que se perdieron por erosión y que no se pueden cuantificar hoy.
* En todos los paleosuelos se presentó una fuerte erosión que los decapitó a todos, eliminando los horizontes A y, muy probablemente parte de otros horizontes subsuperficiales.
* La abundante cantidad de cuarzo, la escasez de feldespatos y otros minerales meteorizables, y la abundancia en esmectitas y caolinita indican una meteorización intensa del material parental, producida bajo un ambiente netamente oxidante.
* Los procesos pedogenéticos dominantes en la formación de los paleosuelos, favorecidos por el clima en que han evolucionado, han sido la mineralización de la materia orgánica; rubefacción, braunificación o pardificación generalizada en el suelo por acumulación de Fe oxidado, con o sin materia orgánica; argiluviación y lessivaje de arcilla; fersialitización que conlleva a la formación de las esmectitas; alcalinización; carbonatación; adensamiento ; vertisolización o argiloturbación y erosión hídrica. Esta línea evolutiva ha evitado la lixiviación de bases y ha generado suelos decapitados, poco meteorizados, de pobres propiedades físicas y calco-sódicos. El color rojo de los paleosuelos se debe a la intensa oxidación del hierro liderado por meteorización y a la rápida mineralización de la materia orgánica originada en un ambiente cálido seco, fuertemente contrastado en humedad, actuando sobre unos materiales arenosos grises.
* Con respecto al índice L/Ar, sus valores también confirman el mediano grado de evolución alcanzado por los paleosuelos evaluados. A pesar de esto, se puede establecer que en ellos se han dado procesos de alteración mineralógica que han producido, por una parte, modificaciones en la mineralogía detrítica, y por otra, neoformación de especies arcillosas como.
* Destrucción de micas y feldespatos que son reemplazados por arcillas, y corrosión de granos de cuarzo por el plasma arcilloso. Esto implica que el sedimento perdió gran parte de su carácter arcósico después de su depositación, y que las esmectitas formadas, que no aparecen en los minerales detríticos, por envejecimiento, hayan sufrido una illitización generalizada.
* En las granulometrías más finas se impregna todo el plasma con compuestos de hierro cuya fuente es, muy posiblemente, la desestabilización de las biotitas y de las cloritas que no han desaparecido por completo en la actualidad.
* Durante el periodo de menor drenaje se produjo la formación de esmectitas, probablemente a partir de la alteración de piroxenos y olivinos (Craigh y Loughnan, 1964 y Loughnan 1969). Posteriormente, con el aumento del drenaje, el suelo pierde los cationes básicos solubles y aumenta la actividad del Al, lo que provoca una progresiva aluminización de los minerales esmectíticos y la formación de caolinita a través del interestratificado illita-esmectita. La llegada de arenas intercaladas con limolitas protege el suelo original de los agentes de alteración y explica que se mantenga todavía en la actualidad el interestratificado illita-esmectita.

*Relación hierro extraído por oxalato (Feo) a hierro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato (Fed) (Feo/Fed).* Esta relación se determinó solamente para el paleosuelo descrito en la capa ferruginosa y los altos valores obtenidos en ella indican una baja cristalinidad de los compuestos de hierro y, consecuentemente, un porcentaje alto de amorfos, lo cual es diagnóstico para suelos que no han alcanzado una madurez evolutiva (Tabla 3)**.**

**Tabla 3.** Valores de la relación (Feo/Fed) del paleosuelo de las Capas ferruginosas en la sección tipo en el desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia.

**VARIACIÓN SINCRÓNICA DE LAS CAPAS ROJAS DEL DESIERTO DE LA TATACOA**

**Variación sincrónica de las capas rojas inferiores.** Como ya se ha dicho, en las capas rojas se identificaron, por lo menos, seis paleosuelos, los cuales no se manifiestan en todos los perfiles a lo largo de la traza indicada en las Figuras 3a y 3b. La variación sincrónica de esta capa se estudió, en detalle, a través del levantamiento de sus rasgos dominantes y su variación espacial, en nueve perfiles pedoestratigráficos, teniendo como base la sección tipo nombrada como MT28-2ST, ya descrita. A continuación, se describen los perfiles estudiados en los otros sitios.

**Perfil 28-1.** Tiene un espesor de 20 m. En él se identificaron tres paleosuelos que, de techo a base, fueron nombrados como 3Btss1-3Btss2; 5Bt; 7Btss. Todos presentan argilanes, son duros en seco y arcillosos. Los horizontes 3Btss y 7Btss presentan condiciones redoximórficas y slickensides. El espesor de los horizontes es de 1.25 m, 3.42 m, 1.57 m y 1.08 m, respectivamente. Solo los dos primeros son consecutivos, los otros dos están separados por capas líticas.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |

**Figura 3a.** Localización y rasgos morfológicos de los perfiles levantados en las capas rojas inferiores del desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia*.*

|  |
| --- |
|  |

**Figura 3b.** Pedoestratigrafía y correlación general que muestra la variación sincrónica de las capas rojas inferiores del desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia*.*

**Perfil 28-3.** Tiene un espesor de 19 m y en él se definieron dos paleosuelos que, de techo a base, fueron nombrados como 4Bt-4Btss-5Bt. Todos presentan argilanes, son duros en seco y tienen textura limosa, arcillosa y limo arcillosa, respectivamente. El 4Btss tiene estructura con tendencia a bloques angulares fuertes y presenta slickensides. El espesor de ellos es de 2.5 m, 1.5 m y 5.0 m, en su orden. Los tres horizontes son continuos, pero entre los dos primeros y el tercero hay marcadas diferencias en textura, estructura y color. Tanto en el techo como en la base se encuentran capas líticas.

**Perfil 28-4.** Tiene un espesor de 26.0 m. En él se encontraron tres paleosuelos, nombrados de techo a base, como 3Bt, 5Bt y 7Btss. Todos presentan argilanes, son muy duros en seco y tienen textura limo arcillosa y arcillosa. Los dos primeros presentan tendencia a una estructura en bloques angulares mientras que en el tercero es evidente la estructura, así como los slickensides. El espesor de ellos es de 4.0 m, 4.5 m y 1.5 m, respectivamente. Todos están separados entre sí por capas líticas.

**Perfil 30-1.** Tiene un espesor de 15 m. En él se observaron cuatro paleosuelos que de techo a base fueron nombrados como 4Bt, 6Bt, 8Bt y 10Btss. Todos presentan argilanes, son muy duros en seco, presentan texturas limosas, limo arcillosas y arcillosas; tienen tendencia a estructura en bloques angulares medios y fuertes, mejor definida en el 10Btss, que presenta, además, slickensides. El espesor de ellos desde el techo es de 0.72 m, 4.30 m, 0.50 m y 0.40 m, respectivamente y están separados por capas líticas. Como rasgo interesante, por encima del 4Bt se encuentra una capa lítica limosa con características redoximórficas y por debajo otra capa de limos pardos amarillentos que gradan discordantemente a arcillas grises.

**Perfil 30-2.** Tiene un espesor de 8.0 m. En él sólo se encontró un paleosuelo nombrado como 2Bt, con argilanes, textura arcillosa y con tendencia a estructura en bloques angulares, muy duro. Su espesor es de 5.5 m y el color es rojo (2.5Y4/6).

**Perfil 30-3.** Tiene un espesor de 9.0 m. Presentó seis paleosuelos que de techo a base fueron nombrados como 4Bt, 6Bt, 8Bt, 10Bt, 12Bt y 14Btknss. Todos presentan argilanes, son extremadamente duros en seco, tienen texturas limosas y estructura con tendencia a bloques angulares, gruesos y fuertes. El 14Btnss tiene slickensides y reacciona fuerte al HCl. El espesor de ellos, de techo a base, es de 1.22 m, 0.70 m, 1.0 m, 1.0 m, 1.10 m y 0.5 m, respectivamente. Todos están separados por capas líticas arcillosas, algunas laminadas y de colores grises y pardo oliva.

**Perfil 30-4.** Tiene un espesor de 13 m. Sólo en este sitio se ha preservado un suelo moderno de 1.5 m. El perfil está constituido por una serie de capas liticas limosas, grises, pardo rojizas, rosa y amarillo pálido. El único paleosuelo encontrado fue nombrado como 6Btss, con presencia de argilanes, extremadamente duro en seco, con textura arcillosa y estructura con tendencia a bloques angulares; tiene un espesor de 3.5 m y en él se observan abundantes grietas abiertas. Las capas líticas superiores presentan características redoximórficas.

**Perfil 31-1.** Tiene un espesor de 31 m, en él se encontraron ocho paleosuelos, nombrados de techo a base como 7Bt, 9Bt1-9Bt2, 11Bt, 13Bt, 15Bt, 17Btknss1-17Btknss2, 18Bt y 21Bt. Todos presentan argilanes, son extremadamente duros en seco y tienen tendencia a formar estructura en bloques angulares, fuertes; presentan texturas limo arcillosas y están separados por capas líticas arcillosas de color pardo grisáceo. En los horizontes 17Btnss1-17Btnss2 la estructura es en bloques angulares gruesos y fuertes y se presentan slickensides, abundantes grietas abiertas y reacción fuerte al HCl. El espesor de los horizontes de los paleosuelos, desde el techo, es de 0.7 m, 0.45 m, 0.25 m, 1.50 m, 1.20 m, 0.50 m, 0.70 m, 0.70 m, 1.20 m, y 1.50 m, respectivamente. Todos presentan colores que varían entre rojo, rojo amarillento y pardo rojizo.

De acuerdo con las descripciones anteriores, las capas rojas inferiores presentan variaciones importantes en todo el transecto de su expresión en el desierto, tanto en los espesores como en las características de sus capas líticas y de los paleosuelos (Figura 3b). Solo en el perfil 30-4 se observó un suelo moderno bien definido con un solum formado por los horizontes A-AB-Bw, bien estructurados y con un espesor de 0.55 m, 0.28 m y 0.42 m, respectivamente. Subyaciendo este suelo se encuentra una capa lítica de arenas finas y medias de color pardo amarillento (10YR5/6).

En casi todos los perfiles se presentó, en la parte superior, una secuencia de dos capas líticas conformadas por conglomerados matriz soportados, heterométricos y heterogéneos, con matriz arenosa gruesa de color gris claro (5Y7/1) y con un espesor promedio de 2.98 m, la cual es subyacida por una capa arenosa media que puede variar entre un color pardo amarillento y gris claro, con un espesor promedio de 2.88 m. Las dos capas superiores mencionadas anteriormente pueden coincidir con lo que Henao (1950) nombró como “Intermediate clays and Sandstone” constituidas por areniscas grises y arcillolitas arenosas de coloraciones grises, de 38 m de espesor, ubicadas estratigráficamente entre las capas rojas superior e inferior.

Por debajo de estas dos capas líticas se encuentran otras que pueden variar entre limos, limos arenosos, limos arcillosos y arcillolitas de colores pardos, pardos rojizos, grises claros y gris verdosos, de diversos espesores, que alternan con los paleosuelos.

El aporte detrítico de la cuenca presenta alta monotonía: es un sedimento inmaduro de limos, lodolitas y arcillolitas de colores pardos, pardo rojizo, gris claro y gris oliva, con abundante cuarzo y siliciclastos, lo que hace que la composición mineralógica en todos los paleosuelos sea bastante similar, cambiando sólo la cantidad y su estado de alteración. En todos los paleosuelos se presentaron horizontes de iluviación de arcilla (Bt) aunque con amplias variaciones en su espesor y en su localización dentro del perfil. Esta persistencia en la iluviación confirma que el clima dominante durante la formación de los paleosuelos fue contrastante en humedad.

El carácter alcalino de los suelos también corrobora que se trató de un clima relativamente seco que no aportó suficiente humedad para lixiviar las bases que se iban liberando por la meteorización. Estas condiciones climáticas netamente oxidantes también explican, por lo menos en buena parte, el enrojecimiento generalizado de las capas rojas, formadas por la oxidación del hierro liberado, por meteorización y/o pedogénesis, de los minerales.

En los paleosuelos diferenciados en todos los perfiles levantados en las capas rojas inferiores hay variación espacial en el color, espesor y textura. Además, en todos hay evidencias de pedogénesis como la presencia de argilanes y el desarrollo de estructura, que se constituyen en los rasgos dominantes y, en menor grado, la presencia de slickensides y la expresión de condiciones redoximórficas.

Las diferencias en los espesores y ubicación, tanto de los paleosuelos como de las capas líticas, sugiere diferencias locales importantes en la dinámica fluvial en la cuenca que aportó los sedimentos para conformar estas unidades estratigráficas. Es notoria, por ejemplo, en el perfil 30-3, la cantidad de horizontes Bt (seis) que están intercalados con capas delgadas de sedimentos separándolos, lo que podría estar relacionado con su localización fisiográfica vecina a la quebrada La Venta que lo estaría afectando con suaves desbordamientos periódicos que no alcanzaron a afectar otros sitios muestreados.

Contrastan con lo anterior los grandes espesores de materiales líticos que se encuentran sobre los paleosuelos de los perfiles 28-1, 28-3, 28-2 ST, 28-4, 30-4 y 31-1, más aislados de la influencia fluvial y, por lo tanto, limitados en pedogénesis. También en la gráfica de correlación de la Figura 3b, se configura la presencia de paleorelieves que pudieron haber incidido en el desarrollo de los paleosuelos debido al carácter denudativo de aquellos, lo que se confirma con las variaciones en los espesores de los horizontes descritos. La mayoría de los horizontes que presentan slickensides u horizontes nátricos se presentaron en la secuencia inferior de paleosuelos. Cuando estos horizontes estuvieron en paleosuelos de la Secuencia Superior, se presentaron en los perfiles localizados hacia el sector más occidental del transecto. Estos horizontes presentan diferencias importantes en el contenido y tipo de arcilla que poseen, con respecto al resto de los horizontes iluviales descritos y su presencia puede indicar cambios puntuales en la dinámica fluvial de la cuenca, que aportó sedimentos más finos, y/o cambios en el régimen de humedad de los suelos hacía condiciones más secas.

**Variación sincrónica en las capas ferruginosas.** Para este estudio se levantaron cuatro perfiles pedoestratigráficos, teniendo como base la sección tipo nombrada como MT-21ST, ya descrita (Figura 4a).

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |

**Figura 4a.** Localización y rasgos morfológicos de los perfiles levantados en la capa ferruginosa del desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia.

**1-1 MT21-ST 31-1 1-2**

**Figura 4b.** Pedoestratigrafía y correlación general que muestra la variación sincrónica de la capa ferruginosa del desierto de La Tatacoa, Huila Colombia.

Esta capa presenta variaciones importantes, tanto en los espesores como en las características del paleosuelo encontrado, resaltándose el hecho de que éste sólo se presentó en los perfiles descritos en el sector ubicado hacía el extremo sur del transecto estudiado (MT21ST, 31-2, Figuras 4a y 4b), y estuvo ausente en el resto del transecto, lo que dificulta el establecimiento de una correlación local entre los perfiles observados al interior de la capa ferruginosa.

En casi todos los perfiles se presentó, en la parte superior, una secuencia de una capa arenas gruesas seguida de otra de arenas finas de color gris claro (5Y7/1), con un espesor promedio de 1.50 m y 1.30 m, respectivamente, las cuales presentan costras muy delgadas de carbonatos que se destruyen fácilmente con una leve presión. Estas capas están subyacidas por una alternancia de limos rojos y arcillas grises muy endurecidas, algunas de ellas con rasgos redoximórficos y, en algunos perfiles, hasta dos paleosuelos. Los perfiles estudiados se describen a continuación.

El **perfil 1-1** tiene un espesor de 8.18 m; su techo está definido por una capa lítica de arena fina de color gris que es subyacida por capas líticas de arcillas, limos y limos arcillosos extremadamente duros sin evidencias pedogenéticas. Hacia la base hay una capa lítica con características redoximórficas que tiene un espesor de 1.25 m y que está entre dos capas arcillosas, la superior de color verde manzana y la inferior de color lila.

El **perfil 31-2** tiene un espesor de 43.09 m. En él se delimitaron dos paleosuelos que, de techo a base fueron nombrados como 6Btss y 8Bt.

Ambos presentan argilanes, son extremadamente duros, con textura arcillosa y tendencia a estructura en bloques angulares gruesos y fuertes; el superior presenta slickensides. El espesor de los paleosuelos es de 1.10 m y 1.30 m, respectivamente, y están separados por capas líticas de limolitas rojas y arcillolitas grises. Entre estos dos paleosuelos se observó una capa que presenta características redoximórficas de 1.8 m de espesor y, por debajo de ella, una capa lila de 0.8 m. Ambas capas se presentan en toda esta unidad, pero, a nivel local, en algunos perfiles los colores son más fuertes o más débiles y sus espesores pueden variar notablemente.

El **perfil 1-2** tiene un espesor de 10.21 m. Su techo está definido por una capa lítica de arena media a gruesa, de color gris, que es subyacida por capas líticas arcillosas, las cuales varían en color y espesor, desde gris verdoso, pardo amarillento, amarillo, pardo rojizo oscuro, naranja y luego, hacia la base, gris. En la parte media se observa una capa con características redoximórficas de 0.96 m, seguida hacia abajo por una capa lila.

En los perfiles levantados, y en las observaciones de esta unidad realizadas en campo se detectaron, en los horizontes de los paleosuelos, evidencias pedogenéticas como el color, la presencia de argilanes, la estructura y los slickensides. En todos los casos estos paleosuelos alternaron con capas líticas. En todos los perfiles se encontraron condiciones redoximórficas en capas líticas limosas o limo arcillosas, por encima o subyaciendo los paleosuelos.

**MACRO Y MICROMORFOLOGIA DE LOS PALEOSUELOS**

En esta investigación se encontraron evidencias macro y micromorfológicas que confirman la presencia de paleosuelos en las secuencias estratigráficas de las capas rojas inferiores y la capa ferruginosa del desierto de La Tatacoa en el Huila, Colombia.

**Evidencias pedogenéticas macroscópicas.** En los paleosuelos de las dos capas estudiadas se encontró desarrollo de color, estructura, cutanes y slickensides en los suelos, así como movilización de arcilla, de óxidos de hierro, de manganeso y de carbonatos de calcio, pudiéndose definir procesos pedogenéticos como iluviación, lessivaje, carbonatación y fersialitización. Los pHs alcalinos observados indican procesos de solodización y las arcillas expansibles produjeron una intensa vertisolización.

Como características dominantes están la coloración roja, con hues 5YR y 7,5YR y values y chromas menores que 6, las texturas arcillosas, el desarrollo estructural, la reacción alcalina y la presencia de argilanes, slickensides y horizontes nátricos y/o cálcicos.

A nivel de campo se presentan evidencias de pedogénesis como el desarrollo de estructura de suelos, aunque no muy avanzado por las condiciones climáticas secas en que han evolucionado (Figuras 5a, 5b). El color rojo de los suelos puede haberse generado mediante procesos simultáneos de meteorización y pedogénesis. La meteorización alteró los minerales primarios de los sedimentos del material parental, lo que liberó hierro de ellos que pasó a la matriz y fue redistribuido en ella por translocación pedogenética.

En una etapa posterior el hierro fue oxidado generando el color característico que inicialmente se presenta en forma de masas como las que se observan en las Figuras 5c y 5ey que, finalmente, le imprimen el color rojo homogéneo a todo el suelo como se aprecia en las figuras 5a, 5b, 5j y 5l. Procesos de liberación por meteorización, translocación, transformación y posterior depositación y acumulación en la matriz del suelo, como los descritos antes para el hierro, también se produjeron con el manganeso y el calcio, como puede verse en las Figuras 5d, 5f, 5g y 5k.

**Figura 5.** Rasgos pedológicos macromorfológicos en paleosuelos del desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia. **a**. Desarrollo de estructura en bloques angulares, gruesos, moderados; **b**. Horizonte oscuro, estructura en bloques, presencia de raíces y nódulos arcillosos; **c**. Masas de hierro en la matriz; **d**. Movilización y depositación de compuestos de hierro (rojos), manganeso (negros) y calcio (blancos); **e**. Argilanes; **f**. Manganes; **g**. Recubrimientos con carbonato de calcio; **h**. Nódulo de arcillas y óxidos de hierro; **i**. Concreciones de hierro y manganeso; **j, k**. Slickensides pedológicos sobre argilanes, manganes y nódulos calcáreos; **l**. Desarrollo de estructura cuneiforme en paleosuelos del desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia.

En una pedogénesis más avanzada se generaron procesos de iluviación y lessivage que dieron origen a los argilanes (Figuras 5e y 5j), a los manganes como los de las Figuras 5f y 5k, y a los recubrimientos calcáreos como los presentes en las Figuras 5d y 5g.En algún momento de la historia genética de estos paleosuelos ellos debieron estar bajo condiciones redoximórficas, las cuales generaron los colores variegados que se presentan en los suelos de las Figuras 5c y 5e, así como la formación de nódulos (Figura 5h) y de concreciones (Figura 5i).

Debido al carácter expansivo de las arcillas predominantes en estos suelos, se dio un proceso intenso de vertisolización que se manifiesta por una gran cantidad de slickensides bien desarrollados, como los que pueden verse en las Figuras 5d, 5j y 5k, además de una estructura cuneiforme típica como la que se observa en la Figura 5l. Nótese que en ocasiones los slickensides (Figuras 5d y 5k) se han desarrollado sobre superficies que ya tenían cutanes de diferentes composiciones (arcillas, óxidos de hierro y/o manganeso). En algunos sitios, las condiciones fuertemente alcalinas han llevado a los suelos a desarrollar estructuras con tendencia columnar (Figura 5c).

Es notable la acción de procesos generadores de pérdidas netas en el suelo como la mineralización de la materia orgánica y la erosión hídrica, los cuales no han permitido el desarrollo y/o conservación de horizontes A en los paleosuelos encontrados.

En la pedogénesis de los paleosuelos se ha presentado un control intenso de dos factores de formación: 1) Clima: Cálido seco, fuertemente estacional en algunos períodos y 2) Material parental: Aportó los minerales primarios adecuados para generar, por meteorización y pedogénesis, altos contenidos de hierro, manganeso y bases, así como arcillas expansivas.

**Evidencias pedogenéticas microscópicas.** Micromorfológicamente se pudieron identificar procesos de difusión de óxidos de hierro y/o manganeso en la matriz del suelo que le imprimieron los colores rojo o negro característicos. Además, se identificaron movilizaciones y acumulaciones de arcilla y de óxidos de hierro y manganeso en poros, y la formación de micro agregados en bloques angulares.

Cuando se realiza un examen micromorfológico de los paleosuelos de las capas rojas inferiores y de la capa ferruginosa, se pueden visualizar minerales como cuarzo, feldespatos, plagioclasas, piroxenos y anfíboles, algunos de procedencia volcánica, así como micas, circones, esfenas y minerales de neoformación como caolinitas, la mayoría de ellos altamente meteorizados. Además, son evidentes óxidos de hierro y manganeso de forma irregular tales como concreciones, masas, opacos y coágulos. Igualmente, componentes de origen orgánico como polen, esporas, restos de tejido vegetal, silicofósiles, tecamebas y diatomeas, estas dos últimas indicativas de que en algún momento el suelo estuvo inundado. En las secciones delgadas de los paleosuelos de la Figura 6, se pueden observar algunos rasgos sobresalientes:

1) La impregnación de todos los materiales con óxidos de hierro, que determina la coloración rojiza de los suelos (Figura 6a). Así mismo, segregación de óxidos de manganeso en cercanías a los poros, formando unos recubrimientos muy oscuros en sus paredes y en el material edáfico aledaño (Figura 6b);

2) Aunque en las secciones delgadas no se puede definir claramente la iluviación de arcilla, sí es evidente la movilización y acumulación de este material en poros de los suelos (Figura 6c). Por la forma en que se presentan estas acumulaciones puede pensarse en un movimiento masivo de la arcilla suspendida en agua que entra de forma cuasi torrencial a los poros, pero cuyo flujo se suspende intempestivamente sin dar tiempo a la orientación de las láminas de la arcilla a lo largo de la pared del poro (Figura 6d);

3) En la mayoría de los suelos analizados es notable el poco desarrollo estructural que presentan: hay poca porosidad y ésta es básicamente planar-tabular. Sin embargo, en varios suelos se aprecia la formación de micro agregados, preferencialmente en forma de bloques angulares (Figura 6d);

4) Se observaron concreciones de hierro y manganeso y se evidenció la movilización y la acumulación de óxidos de hierro y manganeso como cutanes, rellenando poros o como concreciones en los paleosuelos (Figura 6e);

5) Desarrollo estructural muy pobre, algunos micro agregados angulares (Figura 6f);

6) Se encontraron pocos componentes orgánicos en los paleosuelos, pero es posible observar algunos, aunque su identificación es difícil por las formas que presentan, encontrándole semillas, tecamebas, polen y algunos fragmentos vegetales (Figura 6g) y,

5) A nivel de minerales, en algunos suelos es posible diferenciar agregados de estos formando un mosaico fuertemente pleocroico, o como minerales individuales bien conservados y sin rastros de meteorización, tales como circones, piroxenos o anfíboles (Figura 6h, 6i). Fue posible identificar líticos que hacen parte del material parental como algunos granos de areniscas medias y gruesas. A nivel de arcillas, por SEM se caracterizaron tanto física como químicamente montmorillonita, caolinitas, esmectitas e illitas (Figura 6j).

|  |
| --- |
| **Figura 6**. **a.** Impregnación de óxidos de hierro en minerales y matriz; **b.** Segregación de óxidos de manganeso alrededor de poros en forma de recubrimientos muy oscuros y en el material edáfico; **c.** Ferranes y manganes; **d.** Argilanes; **e.** Concreciones de hierro y manganeso. Movilización y acumulación de óxidos de hierro y manganeso como cutanes, rellenando poros o como concreciones en los paleosuelos; **f.** Desarrollo estructural muy pobre**.** Poca porosidad y esta es básicamente planar-tabular, algunos micro agregados angulares; **g**. Bajo contenido de componentes orgánicos, pero se diferencian entre ellos polen, esporas, tejidos, tecamebas, etc.; **h-i.** Minerales en matriz edáfica, algunos de ellos altamente meteorizados (Fotografías al M/o óptico con objetivo de 40x); **j.** Minerales de arcilla en SEM. |

**CONCLUSIONES**

Se confirmó la presencia de paleosuelos en las secuencias estratigráficas de las Capas rojas inferiores y de las Capas ferruginosas del desierto de La Tatacoa, en el Huila, Colombia. Macro y Micromorfológicamente se observaron rasgos pedológicos como cutanes, slickensides, translocación de óxidos de hierro y manganeso, y de carbonatos de calcio. Se observó la formación de estructura de suelo y la generación de color por procesos de transformación de minerales primarios y de translocación de los productos de ella a través de la matriz del suelo.

Se presentó una alta variabilidad espacial en las capas rojas del desierto estudiadas a lo largo de los transectos sobre los que se hicieron observaciones locales de perfiles, tanto en el contenido, espesor y ubicación de los paleosuelos como de las capas líticas con las que están intercalados.

En la evolución de los paleosuelos se presentó un fuerte control climático (seco y estacional contrastado en humedad) y litológico (material parental sedimentario con minerales portadores de bases y de hierro). Estos controles generaron procesos pedogenéticos de iluviación, lessivaje, mineralización de la materia orgánica, solodización, rubefacción, fersialitización, carbonatación, adensamiento y erosión hídrica.

La liberación de hierro de los minerales primarios, por meteorización y/o pedogénesis, su difusión dentro de la matriz del suelo y posterior oxidación, se propone como el mecanismo responsable del color dominante en las capas rojas del desierto de La Tatacoa.

**AGRADECIMIENTOS**

Se reconoce el apoyo logístico de la Facultad de Ciencias de Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, en especial al Señor Decano Arley Zapata (2016-2018); al Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental GAIA de la Universidad de Antioquia; al laboratorio GMAS(+) y, al Señor Jorge Arcila por su valioso acompañamiento durante el trabajo de campo.

**REFERENCIAS**

Buol, S.W. (2010). Evolution of the text Soil Genesis and Classiﬁcation. Soil Survey Horizons 51, 116–117.

Craigh, D.C., Loughnan, F.C. (1964). Chemical and mineralogical transformations accompanying the weathering of basic volcanic rocks form New South Wales. Aust. J. Soil Res. 2, 218-234.

Fields, R.W. y Henao L.D. (1949). *Honda formation of the upper Magdalena river basin, Colombia, S.A.* [abs.]: Geological Society of America Bulletin, v. 60, p. 1894.

Fields, R W. (1959). *Geology of the La Venta Badlands Colombia, South America.* U. California, Publ. Geol. Scienc., 32(6):405-444. California.

Flórez M. T. (2000). Génesis de paleosuelos ándicos a partir del estudio de pedocomponentes, Universidad Nacional, Facultad de Ciencias, Tesis de Maestría, Medellín, 260 pp.

Flórez, M.T., Parra, L.N., Jaramillo, D.F., & Jaramillo, J.M. (2013). Paleosuelos del mioceno en el desierto de la Tatacoa. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 37(143), 229–244.

González, L. H.; Parra, L. N. y Flórez, M. T. (1993). Andisoles fósiles en el Norte de Colombia. Suelos Ecuatoriales 23(1-2): 31-44.

Guerrero J. (1994). Stratigraphy, sedimentary environments, and the Miocene Uplift of the Colombian Andes. Pp: 15-43 en: R.F. Kay, R.H. Madden, R.L. Cifelli, J.J. Flynn (eds.), Vertebrate Paleontology in the Neotropics: the vertebrate fauna of La Venta, Colombia. Smithsonian Institution Press, Washington D.C., USA.

Henao, D.(1950). Geology of La Venta District: the fossiliferous area of the Upper Magdalena Valley. Informe No. 718, Ministerio de Minas y Petroleos, Sección 5a, Servicio Geológico Nacional, Bogotá, Colombia, 49p, + 6 mapas, + 2 columna estratigráfica. Informe técnico, 13 septiembre 1950.

Herd, D. G. (1982). Glacial and volcanic geology of the Ruiz-Tolima volca nic complex, Cordillera Central. Colombia: Publicaciones Geológicas Especiales del INGEOMINAS No. 8. 48 pp.

Kraus M. J. (1999). *Paleosols in clastic sedimentary rocks: their geologic applications*. Earth Science Reviews 47 Ž1999. 41–70.

Loughnan, F.C., (1969). Chemical weathering of the silicate minerals. American Elsevier Publ. Co, New York, 27-66.

Malagón, D.; C. Pulido; R. Llinás y C. Chamorro. (1995). Suelos de Colombia: Origen, evolución, clasificación, distribución y uso. IGAC. Bogotá. 632 p.Malucelli, F., Terribile, F., Colombo, C. (1999). Mineralogy, micromorphology and chemical analysis of Andosols on the Island of São Miguel (Azores): Geoderma, 88, 73-98

Mantilla G., et al. (2011). Los suelos: estabilidad, producción y degradación. En: http://issuu.com/olneyivanescobarforero/docs/7649Morrison R. (1978). Quaternary Soil Stratigraphy. Concepts, Methods, and Problems. En: Cuaternary soil. Third York Quaternary Simposium. Geo Abstracts, Norwich, England.

Nettleton, W.D.; Olson, C.G.; Wysocki, D.A. (2000). Paleosols classification: Problems and solutions. Catena 41: 61–92.

Parra, L.N. (2016). Litoestratigrafía del Neógeno de La Tatacoa, Huila, Colombia. Informe de Año Sabático, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Inédito. 41p.

Parker, A. (1970). An index of weathering for silicate rocks. Geological Magazine 107, 501-504.

Pulido, C.; Malagón, D. y Llinás, R. (1990). Paleosuelos del piso alto andino en la región montañosa circundante a Bogotá. Investigaciones. V. 2, N° 2. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá. 198 p.

Retallack, G. J. (1998). Core concepts of paleopedology. Quaternary International. Volúmenes 51-52, 1998, págs. 203-212.

Retallack, G. J. (2001). Soils of the Past. An introduction to paleopedology, 2nd de Blackwell, USA, 391 pp.

Sánchez, C.1, Salazar, J.1, Bonilla. (2017). Estudio de las unidades pedogenéticas del Mioceno Medio en el Desierto de la Tatacoa 1455-1456. En: Memorias XVI Congreso colombiano de geologia, Santa Marta, Colombia, Agosto 28 - Septiembre 01 de 2017, Bogota, 2077pp.

Salazar Jaramillo, S.; Ochoa, A.; Cadena, A.; Guerrero, J. (2017). Geoquímica y climofunciones aplicadas a paleosuelos del Mioceno Medio en el Desierto de la Tatacoa 1455-1456. En; Memorias XVI congreso colombiano de geologia, Santa Marta, Colombia, Agosto 28 - Septiembre 01 de 2017, Bogota, 2077pp

Salomons J. (1989). Paleoecology of volcanic soils in the Colombian Central Cordillera (Parque Nacional Natural de los Nevados. In: Studies on tropical andean ecosystems. Vol. 3: p. 15-217. Berlín.

Schoeneberger, P.J.; Wysocki, D. A.; Benham, E.C. and Broderson, W.D. (2002). Field book for describing and sampling soils. Version 2.0. Natural Resources Conservation Service. National Soil Survey Center. Lincoln, NE. USA.

Sedov, S., Solleiro-Rebolledo, E., Gama-Castro, J.E., Vallejo-Gómez, E., González-Velázquez, A. (2001). Buried paleosols of Nevado de Toluca: an alternative record of Late Quaternary environmental change in Central Mexico: Journal of Quaternary Science, 16, 375-389.

Sedov, S., Solleiro-Rebolledo, E., Terhorst, B., Solé, J., Flores-Delgadillo, M.L., Werner, G., Poetsch, T. (2009). The Tlaxcala basin paleosol sequence: a multiscale proxy of middle to late Quaternary environmental change in central Mexico: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 26, 448-465.

Shoji, S., M. Nanzyo y R. Dahlgren. (1993). Volcanic ash soils. Genesis, properties and utilization, Elsevier, Science Publishers, Soil Survey Staff. 1999.

Soil Survey Staff (SSS). (1999). Soil Taxonomy A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys, 2nd edition. Agricultural Handbook 436, Natural Resources Conservation Service, USDA, Washington DC, USA, pp. 869.

Soil Survey Staff. (2014). Keys to Soil Taxonomy. Eleventh Edition. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. Washington, D.C. 338 p.

Stirton, R. A. (1953). Vertebrate paleontology and continental stratigraphy in Colombia. Geol. Soc. Am. Bull., 64: 603-622. New York.

Thouret, J. C., A. Murcia, N. Vatin-Perignon, and R. Salinas. (1985). Cronoestratigrafía medianta dataciones K/Ar y C-14 de los volcanes compuestos del Complejo Ruiz-Tolima y aspectos volcano-estructurales del Nevado del Ruiz, p. 292-452. Ingeominas and University of Grenoble, Sexto Congreso Latino Americano de Geología, Medellin, Colombia, october 1985.

Universidad Surcolombiana (USCO). (2005). Convenio Interadministrativo No 1071-200 de 2005, Gobernación del Huila- CAM-USCO.

Van Wambeke. (1991). Soils of the Tropics: properties and appraisal, McGraw Hill, Inc., USA.

Young A. (1976). Tropical soils and soil survey, Cambridge University Press, Cambridge.

1. Universidad de Antioquia. Medellín. E-mail: maria.florez@udea.edu.co [↑](#footnote-ref-1)
2. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. E-mail: lnparra@unal.edu.co [↑](#footnote-ref-2)
3. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. E-mail: djaramal@unal.edu.co [↑](#footnote-ref-3)
4. Gmas+. E-mail: jjaramillo@gmaslab.com [↑](#footnote-ref-4)