

RELACIÓN ENTRE PROCESOS DE EROSIÓN Y GEOQUÍMICA DE SEDIMENTOS Y SUELOS DE CHECUA, CUENCA ALTA DEL RÍO BOGOTÁ

por

Sergio Gaviria¹, Orlando Hernández F.² & Orlando Vargas³

Resumen

Gaviria, S., O. Hernández & O. Vargas: Relación entre procesos de erosión y geoquímica de sedimentos y suelos de Checua, Cuenca Alta del Río Bogotá. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **28** (109): 497-508, 2004. ISSN: 0370-3908.

Por medio de análisis geoquímicos y mineralógicos, se caracterizaron muestras escogidas de suelos y sedimentos en áreas sometidas a procesos de erosión en la región de Checua, localizada en la Cuenca Alta del río Bogotá. El estudio de los suelos permitió evaluar procesos de meteorización ocurridos durante la pedogénesis que reflejan cambios sucesivos en las condiciones ambientales. El estudio de los procesos de erosión, permitió caracterizar posibles fuentes de aporte e identificar los materiales susceptibles al transporte. Estos últimos son: arcillas 1:1 mal cristalizadas y arcillas esmectíticas interestratificadas que forman suspensiones coloidales estables bajo clima seco. Las caolinitas bien cristalizadas, illitas y cloritas, son más difíciles de transportar por las aguas de escorrentía y sedimentan cerca de las fuentes de aporte.

Palabras clave: erosión, geoquímica, sólidos en suspensión, minerales arcillosos, pedogénesis.

Abstract

The present study deals with the relation between erosional processes and the composition of sediments and soils, carried out in the area of Checua, high plain of Bogotá, Colombia. The results obtained from the field and laboratory studies, permit some relationship between weathering processes that occurred during the pedogenesis and understanding of the susceptibility of clay minerals to be transported. Geochemical and mineralogical associations reflect successive changes under the environmental conditions in the Late Quaternary. Clay minerals transported in water suspension are

¹ Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Química. Email: sgaviria@ciencias.unal.edu.co

² Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Química. Email: oherandezf@ciencias.unal.edu.co

³ INGEOMINAS, Diag 53 No. 34-53, Bogotá.

the finest particles with high surface charges. They were identified as bad crystallized 1:1 clay minerals and inter-stratified smectites, giving stable suspensions in dry climates. Well crystallized kaolinites, illites and chlorites are more difficult to be transported in the drainage system.

Key words: erosion, geochemistry, suspended solids, clay minerals, pedogenesis.

Introducción

El propósito de este trabajo es mostrar la dinámica de los procesos de erosión en la microcuenca de Hoyos Hundos - Checua, localizada al norte de la Sabana de Bogotá, paralelo $5^{\circ}10'$ y meridiano $73^{\circ}50'$ (Figura 1). Se basa en el estudio geoquímico y mineralógico de sedimentos y suelos, y en el comportamiento de suspensiones arcillosas en las aguas que drenan la cuenca, para contribuir al manejo ambiental del geosistema. Extensos trabajos de control de erosión se han realizado en la zona desde hace varias décadas con el fin de prevenir el transporte de sedimentos al río Checua y a través de él a la planta de tratamiento de aguas de Tibitó, Zipaquirá (Ortiz, 1980; Henninger *et al.*, 1987; Cárdenas, 1988; Dydynski & Gómez, 1988; Vanegas, 1988). Esos trabajos han requerido grandes esfuerzos económicos y largos periodos de tiempo para lograr resultados por medio de la construc-

ción de obras civiles que reducen las energías de arrastre de partículas y disminuyen el transporte por las aguas de escorrentía hasta el río Checua.

Sin embargo no se había realizado ningún estudio de caracterización de arcillas que permitiera explicar la susceptibilidad de sedimentos y suelos a la erosión. Ingeominas y la Universidad Nacional de Colombia (Departamento de Química) emprendieron la investigación detallada en esa zona, para evaluar los procesos de erosión utilizando el análisis geoquímico como herramienta de estudio sobre el origen de los materiales en sedimentos y suelos y el análisis de los minerales arcillosos como marcadores ambientales y de transformación del paisaje (Gaviria, 1997; Gaviria *et al.*, 2004). El conocimiento de la composición y del comportamiento físico-químico de los coloides arcillosos y otros componentes minerales, puede ayudar a acelerar los procesos de estabilización de terrenos previniendo la erosión, con base en el modelo de carácter práctico implementado en la región.

Materiales utilizados

La zona de estudio corresponde a un pliegue sinclinal sobre rocas sedimentarias del Terciario, Formaciones Bogotá y Cacho, ricas en niveles arcillosos y arenosos respectivamente (Figura 2a), que forman un valle en el piedemonte interno de la Sabana de Bogotá (Mac Laughlin & Arce, 1975). En la depresión central de la quebrada Hoyos Hundos, cuyas aguas drenan hacia el río Checua, se han acumulado sedimentos provenientes de la erosión de las rocas antiguas, dando origen a un depósito heterogéneo equivalente a la Formación Mondoñedo del Cuaternario reciente (Helmens, 1990; Van der Hammen & Hooghiemstra, 1995; Duarte, 1997); también aparecen capas de cenizas volcánicas intercaladas entre los niveles de sedimentos o formando parte de los perfiles de suelos, que fueron traídas por los vientos probablemente desde la Cordillera Central (Macia & Calvache, 1987). Sobre estos materiales se han desarrollado paleosuelos y suelos de características variadas, debido a los cambios en las condiciones ambientales durante la última glaciación y el Holoceno (Van der Hammen, 1995). Actualmente la zona está sometida a fuertes procesos de erosión que han producido cárcavas de varios metros de

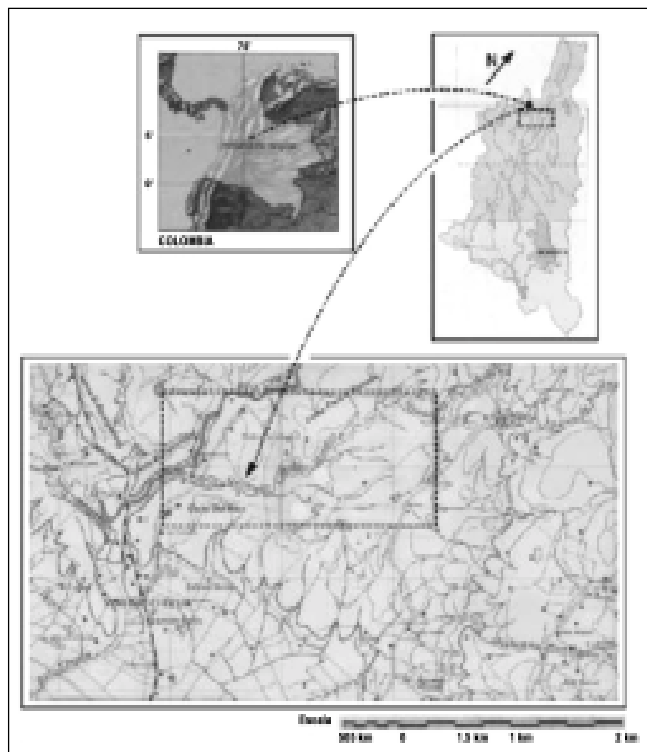


Figura 1. Mapa del área estudiada

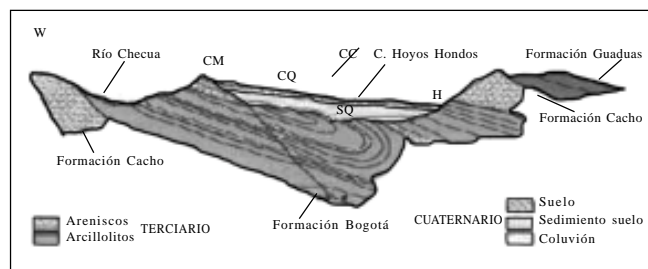


Figura 2a. Sección Quebrada Hoyos Hondos (Corte E-W Sinclinal de Checua) (tomado de Duarte, 1997). SQ corresponde a la serie de sedimentos cuaternarios; CM, CC, CQ y H son los perfiles de suelos y paleosuelos estudiados.

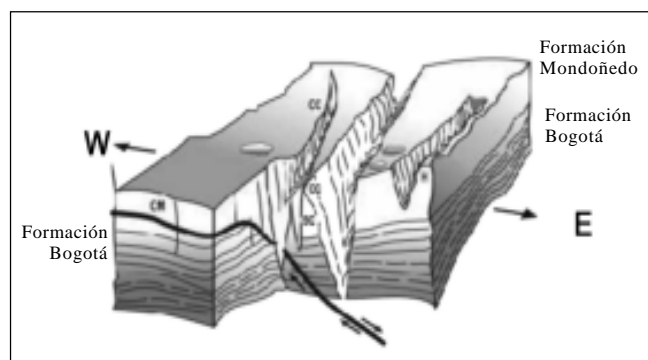


Figura 2b. Zona de Estudio con la representación de las cárcavas de erosión y la localización de los sedimentos y suelos estudiados.

profundidad, destapando progresivamente los suelos antiguos, los sedimentos cuaternarios y las rocas terciarias (Duarte, 1997).

Se escogieron cuatro perfiles de suelos (CC, H, CM y CQ) localizados en la cabecera, los bordes y el centro de la microcuenca respectivamente (Figuras 1 y 2). Estos suelos presentan perfiles complejos superpuestos (paleosuelos) en los cuales se identifican horizontes eluviales (E) e iluviales (Bt(h)), lo que permite clasificarlos en el orden de los alfisoles. Aunque no se realizó el estudio analítico para obtener una taxonomía detallada, con base en la descripción de los horizontes en campo, los análisis granulométricos y químicos y por comparación con resultados obtenidos para la región por otros estudios (Fölster & Hetsch, 1978; Malagón *et al.*, 1990; IGAC, 2000), los (paleo) suelos superiores corresponden a udalfs o ustalfs, dependiendo de los regímenes climáticos prevaecientes durante su desarrollo. Así CM es un Hapludalf, la sección superior de H es un Paleustalfs y la sección superior de CC y CQ corresponde a Paleudalfs.

Condiciones pedogénéticas variadas aparecen en niveles enterrados por depósitos coluviales finos (C), tales como costras de carbonato (K), horizontes endurecidos (m), horizontes de alteración (B_w) y presencia de nódulos de hierro (c). Para un mejor entendimiento de los procesos se asignaron las nomenclaturas a los horizontes que aparecen en la Tabla No 1, de acuerdo con el **Soil Survey Staff** (1990). Para cada perfil se tomó una muestra de cada uno de sus horizontes. También se recolectaron muestras de cada nivel de la serie de sedimentos subyacentes (SQ) de la Formación Mondoñedo y varios niveles de cenizas volcánicas conservadas sobre los sedimentos y dentro de los suelos.

Se tomaron muestras de aguas con su carga de sedimentos en varios sitios representativos de la microcuenca, en época de lluvias y en época de verano para comparar los aportes a la cuenca y para evaluar los tipos de materiales transportados en suspensión (Figuras 1 y 7; Tabla 2).

Métodos de caracterización

La composición química se determinó según los métodos empleados en el Laboratorio Químico de Ingeominas: análisis químico total de elementos mayores (Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K y Ti) y algunos elementos traza (Cu, Ni, Zn, Pb y Cd) por ataque con ácido fluorhídrico y análisis por absorción atómica según lo describe Thomas (1976). El análisis de composición química se completó con la determinación de pérdidas por calcinación a 1000°C. Los resultados aparecen en la Tabla 1. Los elementos mayores aportan información valiosa sobre las variaciones en la composición química de los horizontes, lo que ayuda a la interpretación de procesos pedogénéticos o sedimentológicos. El análisis de los elementos traza escogidos, contribuye al planteamiento de hipótesis sobre la proveniencia de los materiales, así en esta etapa del estudio no se haya profundizado en los mecanismos que rigen sus afinidades geoquímicas en las rocas fuente, en los sedimentos y en las cenizas volcánicas.

Se determinó la granulometría de las muestras de suelos y sedimentos por sedigrafía de rayos X, que mide la interferencia al paso de la radiación por las partículas presentes en suspensión en relación con su tamaño. Los resultados se muestran en la Figura 3.

Se realizaron análisis por difracción de rayos X (DRX) de cenizas volcánicas, sedimentos y suelos. El análisis de ceniza volcánica se realizó sobre la muestra total en polvo desorientado, con el fin de identificar todos los minerales cristalinos y evaluar la presencia de materiales amorfos. Un ejemplo se presenta en la Figura 4.

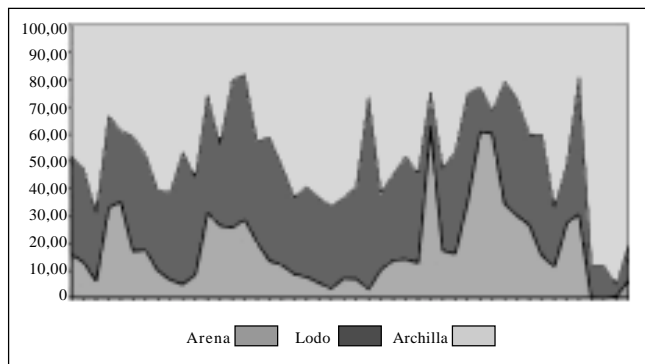


Figura 3. Granulometría de suelos, sedimentos y sólidos en suspensión.

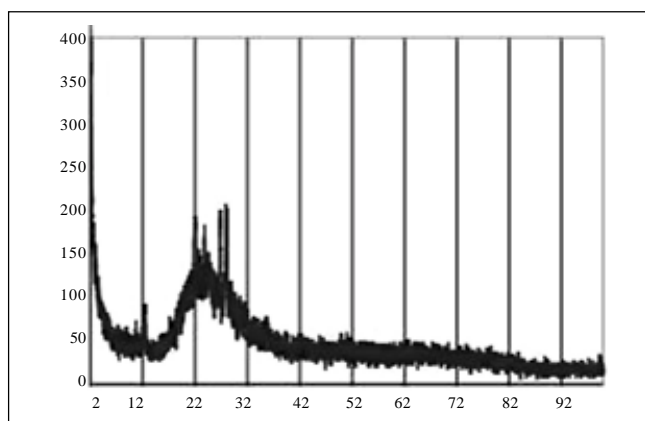


Figura 4. Difractograma de Rayos x de ceniza volcánica sobre muestra en polvo desorientado.

Los minerales secundarios en sedimentos y suelos, principalmente arcillas y sesquióxidos, se determinaron por DRX sobre la fracción $<2\mu\text{m}$ en lámina orientada con tres tratamientos: normal (N), etilenglicol (EG) y calentada a 500°C (500), siguiendo la metodología de **Thorez** (1976). La comparación de los difractogramas sucesivos realizados sobre la misma preparación, permite diferenciar las familias principales de arcillas y ayuda a caracterizar especies interestratificadas y estructuras mal cristalizadas que no siempre se aprecian en los análisis tradicionales. Estos materiales corresponden a productos intermedios en los procesos de meteorización, informan sobre las génesis de los suelos y sedimentos, así como las relaciones entre el comportamiento fisicoquímico y los procesos de erosión. En la mayoría de los casos aparece abundante cuarzo de tamaño muy fino, con sus reflexiones características en ángulos altos ($>20^\circ 2\theta$), lo que obliga a cortar los difractogramas por debajo de ese valor con el fin de apreciar las primeras reflexiones de los minerales arcillosos que se presentan en ángulos bajos ($<20^\circ 2\theta$). Al-

gunos difractogramas característicos se muestran en la Figura 5.

En forma complementaria se utilizó la espectroscopia infrarroja (IR) por irradiación de la fracción $<2\text{mm}$ de suelos y sedimentos, diluida en pastilla de KBr al 1%, para evaluar la cristalinidad de las arcillas 1:1. Se presentan algunos ejemplos de los espectros obtenidos en la Figura 6.

Se determinaron pH, conductividad, sólidos en suspensión y turbiedad en las aguas de drenaje, para evaluar las condiciones fisicoquímicas y la magnitud del transporte de sedimentos a través de los drenajes (Figura 7 y Tabla 2). Los sólidos en suspensión recolectados en una de las aguas de drenaje con mayor carga se sometieron a dos tratamientos de floculación: con cloruro de estroncio 1M (Sr) y con HCl 2M (H^+). También se realizó un fraccionamiento granulométrico por gravedad durante 24 horas sobre la misma muestra y se obtuvo un sedimento superior (SS) y un sedimento inferior (SI). Las muestras secadas al aire se analizaron químicamente (Tabla 1) y por DRX en lámina orientada con los mismos tratamientos descritos anteriormente (Figura 8).

Resultados y discusión

Análisis geoquímico de elementos mayores:

El análisis químico de elementos mayores, expresado en porcentaje en óxido del elemento, muestra que en general los sedimentos y los suelos son muy ricos en Si (60 a 87%), el Al fluctúa entre 5 y 20%, el Fe varía entre 2 y 8%, la suma de bases (Ca, Mg, Na, K) entre 2 y 3% y el Ti es menor del 1%. Las pérdidas por calcinación van del 4 al 15%. Esta composición refleja que los materiales están constituidos por minerales arcillosos (silicatos de aluminio hidratados con bajo contenido en bases), sílice libre generalmente en cantidades apreciables y óxidos de hierro. Eventualmente este último elemento puede estar también asociado a las estructuras de algunas arcillas.

Las cenizas volcánicas tienen alto contenido en Si, son ricas en bases y sus pérdidas por calcinación son muy bajas, lo que muestra una fuente inicial de composición diferente a la de los otros materiales (Tabla 1). Reflejan el origen ígneo del material volcánico, en contraste con el origen sedimentario y los procesos de meteorización en los sedimentos y suelos de la región.

La composición de los sedimentos y los suelos muestra variaciones en el contenido de Al y Si lo que denota cambios en el contenido en arcillas y en materiales silíceos respectivamente. Así, los sedimentos SQ contienen los ni-

Tabla 1. Análisis químico de elementos mayores (% de óxidos) y pérdida por calentamiento (%) en base seca y de elementos traza (ppm)

Horizonte	Muestra	Profundidad	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Bases %	TiO ₂ %	Fe ₂ O ₃ %	Pérdidas %	Cu ppm	Ni ppm	Zn ppm	Pb ppm	Cd ppm
E ₁	CM4	0-10	73,13	9,95	1,72	0,88	2,84	11,42	17,00	14,39	66,58	18,29	2,61
E ₂	CM3	10-25	69,50	12,56	2,04	0,90	3,49	11,47	18,69	18,64	73,53	24,53	3,15
B _{1bh}	CM2	25-65	63,40	14,48	2,13	0,81	3,55	15,60	27,01	26,85	118,22	22,10	2,80
C	CM1	65-75	75,52	10,16	1,96	0,72	4,31	6,28	22,07	22,48	89,51	18,00	2,75
E ₁	CC1	0-30	77,54	8,50	1,83	0,63	3,72	7,76	0,00	0,41	0,01	26,35	0,71
E ₂	CC2	30-100	74,02	11,34	2,33	0,71	3,57	8,01	0,00	0,41	0,01	18,41	1,12
2E _{3cmb}	CC3	100-110	73,68	11,71	1,95	0,58	3,43	8,60	0,00	0,41	0,01	21,35	0,41
2B _{4bh}	CC4	110-140	64,90	16,44	2,31	0,75	4,15	11,42	0,00	0,61	0,01	22,75	1,23
2B _{7bh}	CC5	140-170	66,15	16,25	2,31	0,73	4,00	10,54	0,00	0,82	0,01	21,59	2,76
2C ₁	CC6	170-220	67,54	16,63	2,61	0,71	4,15	8,36	0,00	0,71	0,02	18,15	2,24
2C ₂	CC7	220-240	65,94	16,63	2,36	0,86	4,15	10,05	0,00	0,82	0,02	20,64	2,76
3C _m	CC8	240-260	81,22	8,12	3,02	0,78	2,57	4,26	0,00	0,30	0,01	16,69	1,72
3C	CC9	260-270	76,06	10,96	2,55	0,70	3,29	6,42	0,00	0,41	0,02	21,31	3,16
4B _{1bh}	CC10	270-280	74,06	9,45	4,77	0,61	3,72	7,39	0,00	0,51	0,01	16,60	2,83
K	CCCO ₃ ^{-*}		5,15	2,27	52,12	0,14	0,71	39,51	0,00	0,40	0,00	9,63	15,93
5B _{1bh}	CC11	280-310	76,93	10,58	2,38	0,40	3,86	5,84	0,00	0,51	0,01	27,20	1,73
E ₁	CQ8	0-22	76,94	9,53	1,99	0,28	3,07	8,14	13,80	13,24	54,99	16,29	1,99
2E _{2mb}	CQ7	22-55	71,31	11,65	2,38	0,30	3,54	10,78	17,12	19,34	72,61	21,82	2,63
2B _{1bh}	CQ5	55-88	64,01	14,71	2,74	0,73	4,56	13,21	19,20	20,19	79,73	26,25	3,65
2C _m	CQ5	88-100	65,95	12,81	2,86	0,84	3,76	13,74	22,22	25,25	118,52	23,63	3,34
3B _{1bh}	CQ4	100-145	61,22	16,51	2,60	0,87	4,20	14,57	18,18	20,22	92,41	21,53	2,36
3C	CQ3	145-165	64,74	14,59	2,37	0,89	2,81	14,59	23,43	21,38	96,48	25,47	2,20
4C _m	CQ2	165-185	60,74	16,74	3,54	1,02	3,22	14,73	25,67	28,47	161,96	23,67	3,11
5BC _{1b}	CQ1	185-188	67,86	15,28	8,88	0,80	2,03	5,10	10,83	7,20	54,35	32,09	0,96
5C	CQ0	188-198	68,92	14,33	8,90	0,77	2,45	4,58	10,77	6,14	40,37	21,14	1,61
6C	CQ(-1)	198-203	65,68	16,47	3,33	0,89	3,19	10,42	33,73	24,43	105,68	24,17	2,79
7C	SQ1	0-20	69,87	15,68	2,52	0,31	4,00	7,91	0,00	0,51	0,01	25,72	2,78
8C	SQ2	20-65	72,46	14,17	2,32	0,25	3,57	7,47	0,00	0,72	0,01	22,82	1,74
9C	SQ3	65-80	66,83	15,30	2,36	0,58	6,58	8,89	0,00	0,51	0,01	21,63	3,09
10C	SQ4	80-110	76,53	10,77	2,08	0,49	5,29	5,31	0,00	0,91	0,05	29,26	21,89
11C	SQ5	110-170	65,24	19,84	2,74	0,37	4,00	8,16	0,00	0,82	0,02	44,33	21,75
12C	SQ6	170-290	67,85	17,76	2,34	0,38	4,58	7,46	0,00	0,81	0,01	21,97	12,62
13C	SQ7	290-410	66,84	16,06	3,37	0,66	6,29	7,33	0,01	1,12	0,03	17,88	19,82
c	Fe ³⁺ **	H5	44,00	8,63	1,84	0,76	31,84	12,43	25,87	34,99	106,01	67,31	20,67
E ₁	H8	0-20	85,58	4,95	1,34	0,84	2,85	3,42	5,69	6,85	33,41	12,60	1,81
E ₂	H7	20-40	82,45	6,23	0,87	0,81	3,59	6,02	8,58	11,58	52,63	20,22	3,10
2E _{3cmb}	H6	40-60	83,16	6,48	2,87	0,38	1,84	5,19	5,54	5,84	28,21	16,67	1,37
2B _{1bh}	H5	60-80	53,45	19,30	2,98	0,93	5,84	17,46	9,42	18,95	73,79	21,24	3,70
3C	H4	80-97	53,28	16,81	1,81	0,90	5,40	11,79	28,06	27,54	90,26	28,58	4,26
4CK	H3	97-100	31,27	5,87	29,46	0,70	2,94	29,75	14,22	12,24	43,33	15,49	3,00
5B _{1bh}	H2	100-140	68,98	12,66	1,78	0,59	7,68	8,30	22,32	21,50	75,16	24,16	5,39
5B _{1bh}	H1	140-160	71,89	12,25	1,80	0,66	6,93	6,44	24,78	25,44	93,48	25,69	4,21
	CENIZAS		72,32	12,62	8,23	0,25	2,01	4,53	0,00	0,40	0,01	53,50	4,12
	CCCENIZAS		65,89	15,87	11,21	0,24	3,57	3,15	0,00	0,40	0,01	53,50	4,12
	Sr		51,12	26,56	2,16	0,10	7,01	13,44	0,00	0,83	0,01	73,49	4,16
	H ⁺		44,88	18,33	1,87	0,70	5,58	28,64	0,00	0,71	0,01	22,90	1,51
	SS		39,82	24,00	1,97	0,17	0,00	28,64	0,00	0,81	0,01	6,05	1,41
	SI		64,46	18,71	1,84	1,21	4,58	10,42	0,00	0,61	0,01	24,12	1,93

CM: Hapludalf; CC y CQ: Paleudalf; H: Paleustalf

* CCCO₃⁻: costra de carbonato (K) separada del perfil CC (4B_{1bh})** Fe³⁺: nódulos de óxidos hierro separados del perfil H (2E_{3cmb})Sr, H⁺, SS y SI corresponden a los sólidos en suspensión separados de una muestra de agua: por floculación con cloruro de estroncio (Sr) y ácido clorhídrico (H⁺) y fracciones superiores (SS) e inferiores (SI) por sedimentación en 24 horas.

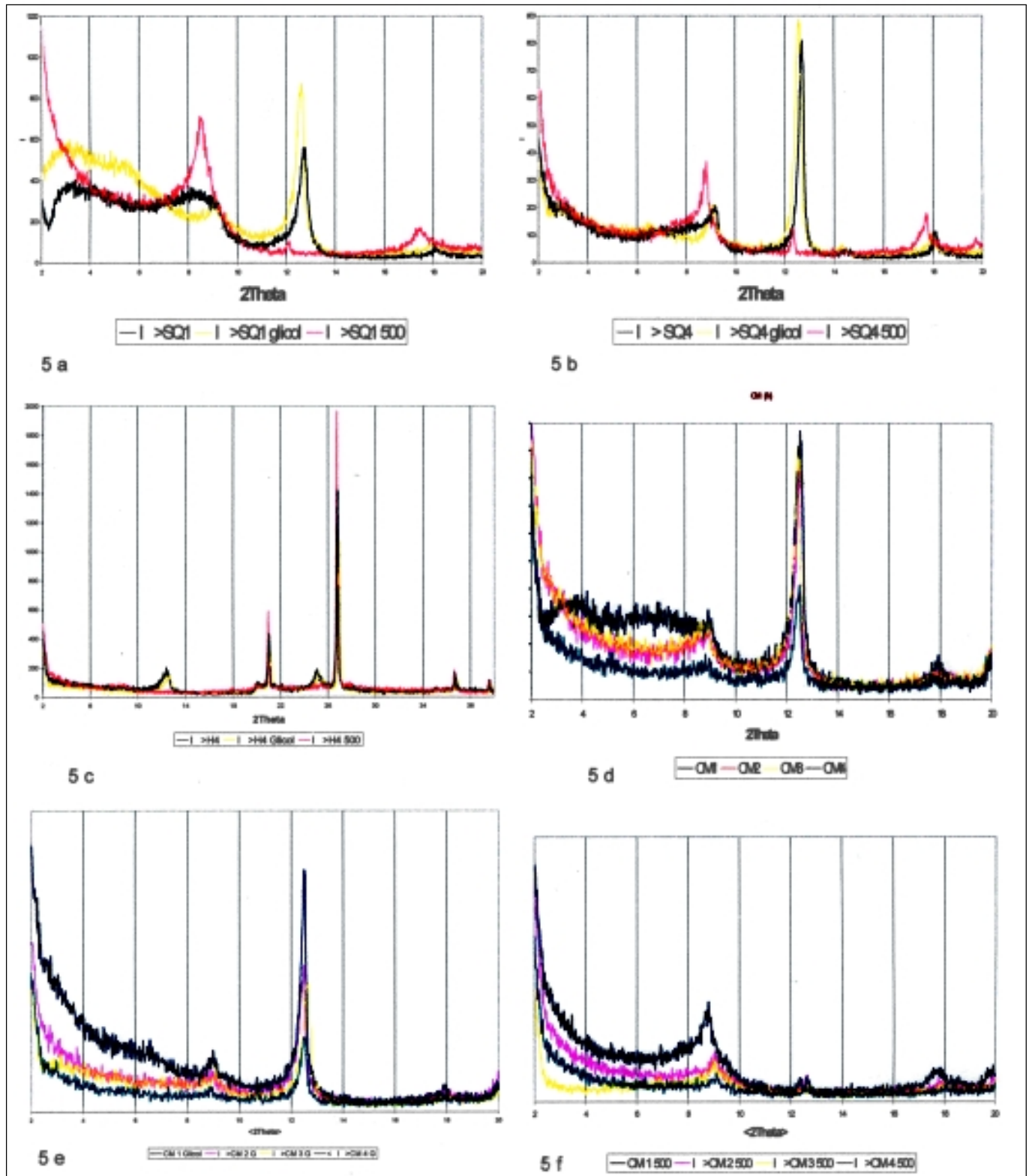


Figura 5. Difractogramas de rayos X de muestras de sedimentos y suelos sobre la fracción <math><2\mu\text{m}</math> en lámina orientada con tratamiento normal, etilen glicol y a 500°C. 5a. SQ1 5b. SQ4 5c. H4 5d., 5e., y 5f. Perfil CM ((N), (EG) y (500) respectivamente.

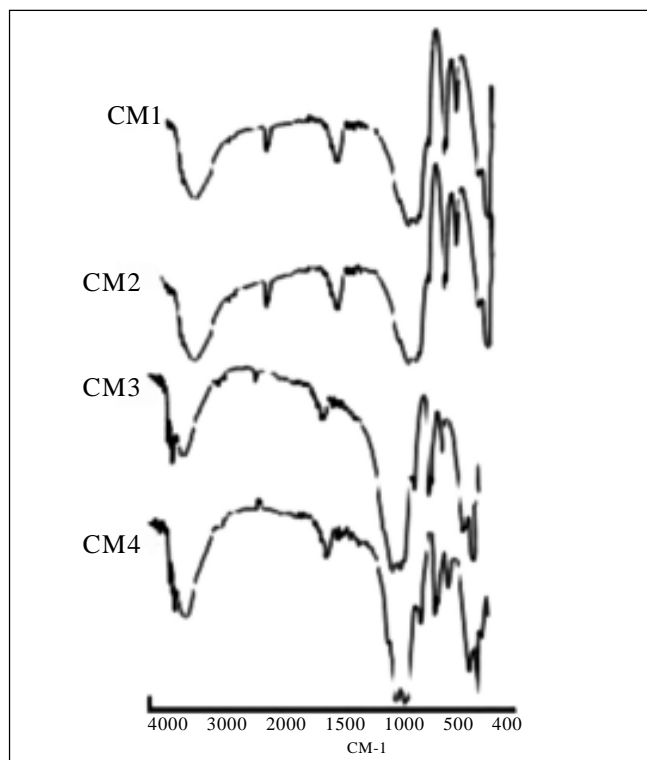


Figura 6. Análisis de espectros infrarrojos del perfil de suelo CM (Haplustalf)

veles más ricos en Al, mientras que los horizontes superiores de los suelos son pobres en Al y ricos en Si; esta relación se invierte generalmente hacia el fondo de los perfiles, aunque aparecen horizontes intercalados de composición variable. El empobrecimiento en arcillas de los horizontes superiores y el enriquecimiento en los horizontes subyacentes, refleja procesos de migración de partículas finas en los perfiles; las variaciones composicionales entre horizontes de suelo o entre niveles de sedimentos sucesivos, indican aporte de materiales de composición diferente durante la sedimentación y también durante la pedogénesis (procesos de erosión antiguos).

En algunos de los suelos (perfiles H y CC ver Tabla No 1) aparecen niveles con carbonatos de calcio encima de horizonte B_w enterrados formando costras de poco espesor (<1cm). También se presentan horizontes con concreciones ricas en hierro (perfil H - Fe³⁺, Tabla 1), en el seno de un horizonte E endurecido, donde la matriz del suelo está empobrecida en este elemento. Estos cambios en la geoquímica de los perfiles indican variaciones notables en las condiciones ambientales relacionadas con cambios del clima durante la pedogénesis: climas muy secos propician la precipitación de carbonato de calcio (caliche)

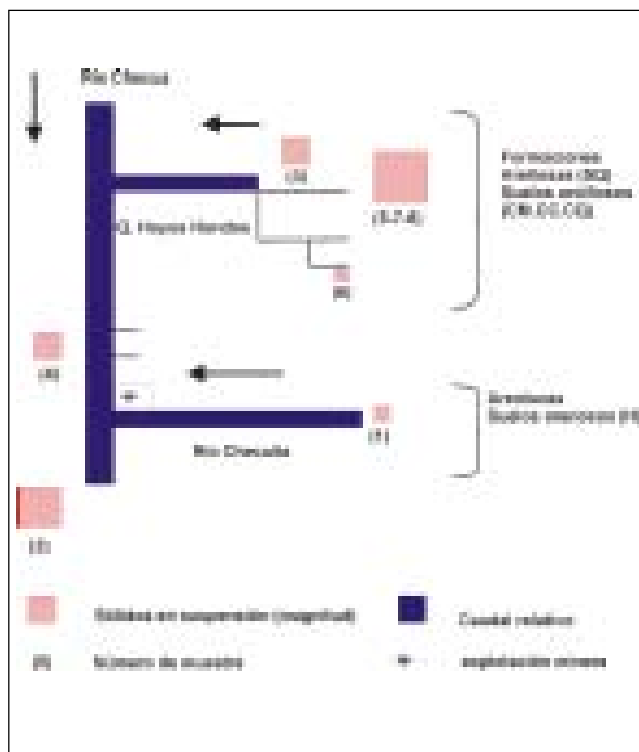


Figura 7. Esquema que indica los puntos de recolección de muestras de agua en los sistemas de drenaje (datos en la tabla 2).

en los suelos; climas con contraste húmedo y seco promueven la movilización del hierro de los óxidos por cambios en las condiciones redox ligadas a la posición del nivel freático en los suelos (Gaviria, 1993).

Análisis granulométricos

Los resultados anteriores se confirman cuando se hace el análisis textural de los materiales (Figura 3). La granulometría muestra la existencia de sedimentos limo-arcillosos intercalados con niveles limo-arenosos (SQ). También aparecen suelos de textura arcillo-limosa pobres en arenas (CM, CC y CQ), y suelos más ricos en limos y arenas (H). En cada perfil existen diferencias en la granulometría entre los horizontes, generalmente con un incremento en el contenido de arcillas en los horizontes superiores cuando se pasa de horizontes eluviales a horizontes iluviales. Sin embargo, reflejando los resultados composicionales, también existen diferencias texturales entre los horizontes inferiores sucesivos (paleosuelos), al igual que en los sedimentos subyacentes. Los suelos más arcillosos son los más ricos en Al debido al mayor contenido en minerales silico-aluminosos; los suelos limo-arenosos poseen altos contenidos en Si, lo que está indicando abundante presencia de cuarzo.

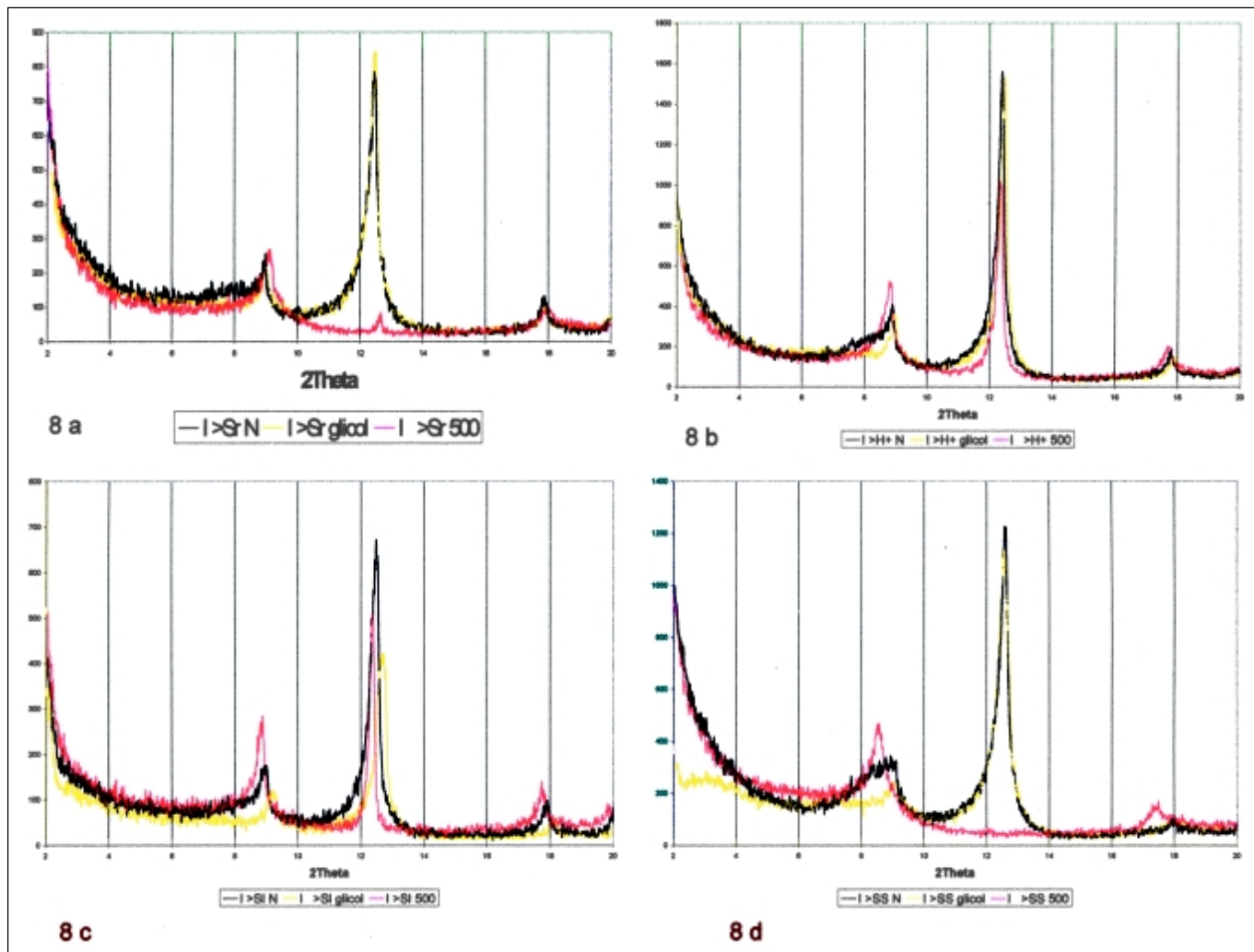


Figura 8. Difractogramas de rayos X de los sólidos en suspensión con tratamiento normal (N), etilen glicol (EG) y a 500°C (500). **8a.** Sr (floculado con cloruro de estroncio); **8b.** H⁺ (floculado con HCl diluido); **8c.** SI; **8d.** SS (separados por sedimentación, fracción inferior y superior respectivamente).

Análisis geoquímicos con elementos traza

Los análisis de elementos traza permiten hacer una evaluación sobre el origen de los materiales constitutivos de los suelos, a partir de las posibles fuentes de aporte: Los cinco elementos escogidos (Cu, Ni, Zn, Pb y Cd) presentes a nivel de partes por millón (ppm = mg/Kg), tienen una distribución muy parecida en los sedimentos SQ y en el perfil de suelo CC, localizado en la cabecera del valle. En estos materiales, Cu, Ni y Zn están casi ausentes, mientras Pb y Cd están presentes en pequeña proporción, lo que da indicios sobre la fuerte influencia de los sedimentos de la Formación Mondoñedo en la génesis de este suelo. Sin embargo, la ceniza volcánica que aparece en la base de los suelos, tiene una distribución pare-

cida en el contenido de estos elementos traza, lo que impide discriminar por esta técnica geoquímica estas dos fuentes de material de origen (Tabla 1).

La distribución de estos elementos en los otros suelos localizados en el borde y el centro del valle es notablemente diferente (CM, H y CQ ver tabla No 1); en estos materiales Cu, Ni y Zn están presentes en contenidos traza importantes, marcando un fuerte contraste con el grupo anterior. Las cenizas volcánicas que aparecen incorporadas a estos suelos, a diferencia de las que se encuentran en la base de los perfiles, contienen estos elementos en mayor proporción, lo que podría apoyar su posible influencia en el desarrollo de los suelos. Sin embargo, estos resultados son hasta ahora muy preliminares;

los estudios geoquímicos y mineralógicos sobre las formaciones terciarias y cretáceas que se están realizando actualmente en la región (Gaviria *et al.*, 2002), permitirán precisar la influencia de otros niveles de rocas sedimentarias más antiguas en el desarrollo tanto de los sedimentos Cuaternarios como de los suelos en la región.

Análisis mineralógicos

Para completar el estudio, se realizaron los análisis mineralógicos que permiten identificar las asociaciones de minerales presentes en las cenizas volcánicas, los sedimentos y los suelos:

Las cenizas volcánicas localizadas en la base de los suelos se caracterizan por presentar una banda ancha entre 12 y $40^\circ 2\theta$ en el análisis por DRX (Figura 4), lo que pone en evidencia que la mayor parte del material está constituido por productos amorfos derivados de vidrio volcánico, con muy poca alteración (pico de 7Å de baja intensidad de arcilla 1:1 muy mal cristalizada). Algunos picos de difracción de baja intensidad muestran minerales cristalinos como cuarzo (Q), feldespatos (F) y micas (M). El material volcánico original se puede clasificar como de tipo dacítico (Cox *et al.*, 1979).

Los difractogramas de los sedimentos de la Formación Mondoñedo, tanto arcillosos como arenosos (SQ1 y SQ4), muestran el predominio de arcillas de tipo 1:1, seguido de un mineral esmectítico interestratificado de tipo 10-14 Sm, Illita y un mineral clorítico en muy baja proporción. La proporción de arcillas 1:1 con respecto a las especies 2:1 es mayor en los sedimentos más arenosos (Figura 5 a y b).

Lo anterior se deduce del análisis con los tres tratamientos sobre la fracción arcilla: el pico a $12,4 2\theta$ ($7,1\text{Å}$) que desaparece por calentamiento es característico de una arcilla 1:1 tipo caolinita; una banda entre 10 y 14Å que se corre a ángulos menores por solvatación con etilenglicol y que colapsa a 10Å por calentamiento, es característica del interestratificado esmectítico; el pico a $9,1\text{Å}$ que permanece en todos los tratamientos, corresponde a un mineral 2:1 de tipo illítico; un pico remanente a 7Å después del calentamiento parece corresponder a un mineral clorítico en bajas proporciones, para el cual la primera reflexión de 14Å no es evidente. Esto se ha observado en especies cloríticas que contienen hierro dentro de la estructura (Thorez, 1976).

La presencia de cuarzo en la fracción arcilla de los suelos y en algunos niveles de sedimentos es notoria, particularmente importante en el perfil H. Esto se aprecia

claramente en los difractogramas del horizonte H4 que se presentan hasta el ángulo $40^\circ 2\theta$, donde la intensidad de los picos de las arcillas están fuertemente reducidos por la dilución de la fracción fina en cuarzo (Figura 5c). En este caso, además del cuarzo presente en gran proporción, las arcillas son principalmente de tipo 1:1. El cuarzo debe provenir de las formaciones terciarias, principalmente de las más ricas en niveles de arenas cuarcíticas (Formación Cacho y/o areniscas más antiguas).

Un ejemplo interesante lo presenta el Hapludalf arcillolimoso CM, caracterizado por la migración de arcillas dentro del perfil (Figura 5 d, e y f). Este suelo está superpuesto directamente sobre un nivel un poco más arenoso de la Formación Bogotá (CM1) que aparece cerca de la superficie por efecto de una falla (Figura 2). Los tres horizontes superiores del suelo en tratamiento normal son muy similares, indicando la presencia de los mismos minerales arcillosos (CM4 a CM2). Sin embargo, las intensidades de los picos de las arcillas 1:1 e Illita aumentan con la profundidad. El tratamiento con etilenglicol de las láminas orientadas del perfil CM muestran poca variación para los tres horizontes superiores, lo que indica baja proporción o ausencia de minerales esmectíticos. En todos los casos aparece un pequeño remanente de clorita. Finalmente, el nivel CM1 es bastante diferente a los horizontes del suelo, ya que además de las arcillas mencionadas, presenta una proporción importante del mineral interestratificado 10-14Sm que se identificó en los sedimentos de la Formación Mondoñedo (SQ). Lo anterior indica una relación entre el material de origen de los sedimentos cuaternarios y las arcillas constitutivas de las rocas terciarias que afloran en la región.

Por otro lado, en el perfil CM, la cristalinidad de las arcillas 1:1 se pone de manifiesto por medio de los análisis Infrarrojos (Figura 6). En superficie, las bandas en la región de 3600 cm^{-1} que caracterizan las vibraciones de los enlaces -O-H son poco visibles (CM4), mientras que se vuelven intensos y aumentan con la profundidad, lo que evidencia el incremento en la cristalinidad de las arcillas 1:1. Pasan de estructuras muy mal cristalizadas en superficie (caolinitas y/o metahalositas) a estructuras caoliniticas mejor cristalizadas en el fondo del perfil.

Los resultados anteriores parecen indicar que la aparición de los minerales esmectíticos y el incremento en la cristalinidad de la caolinita corresponden a una mayor influencia de las rocas arcillosas del Terciario (Formación Bogotá u otras) o de los sedimentos cuaternarios (Formación Mondoñedo) durante la génesis de los suelos. Por el contrario, la ausencia de minerales esmectíticos y la

baja cristalinidad de las arcillas 1:1 indican pérdida de estos materiales en los horizontes superiores de los suelos y/o influencia de cenizas volcánicas alteradas en la pedogénesis.

Análisis de aguas y sólidos en suspensión

Las aguas que drenan la zona fueron analizadas tomando algunas muestras en períodos diferentes (Tabla 2; Figura 7). Los resultados muestran que los pH fluctúan alrededor y por encima de 7, es decir, son aguas neutras a ligeramente alcalinas; las conductividades están entre 80 y más de 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valores considerados altos para aguas de escorrentía, lo que refleja aporte de iones en solución por interacción con las rocas aflorantes; la turbiedad y los sólidos en suspensión son muy variables, entre 100 y más de 2000 NTU y entre 30 y más de 2000 mg/l respectivamente, lo que indica aporte de sedimentos en todo el sistema de drenaje.

Las aguas de los drenajes locales y de las quebradas con mayor carga de sedimentos son aquellas que lavan los niveles de suelos y sedimentos más afectados por la erosión, mientras que los ríos Checua y Chequita que drenan zonas donde las obras de control de erosión se mantienen, tienen bajas cargas de sólidos en suspensión. Sin embargo, el río Checua se carga nuevamente de sedimentos cuando recibe los aportes de la Quebrada Hoyos Hondos por efecto de las explotaciones mineras que extraen arcillas de la Formación Bogotá. (Figura 7).

Los resultados de mineralogía corresponden a una muestra de agua muy cargada con sedimentos, que lava la parte central del valle y drena hacia la Quebrada Hoyos Hondos. Los análisis DRX de los sólidos en suspensión separados con agentes floculantes (Sr , H^+) o por gravedad (SS, SI), dieron los siguientes resultados (Figura 8):

En la muestra floculada con Sr, agente poco agresivo desde el punto de vista químico, predominan las arcillas de tipo 1:1 caolinítica, illita, y en menor proporción el interestratificado 10-14 Sm y un mineral clorítico en muy baja cantidad (Figura 8a). Lo anterior muestra que los tipos de arcillas que son transportados por las aguas en suspensión, corresponden a los mismos minerales arcillosos presentes en sedimentos y suelos (Figura 5), pero que probablemente se transportan más fácilmente unos que otros. En este caso las arcillas 1:1 parecen ser las más móviles.

La muestra floculada con ácido diluido, a diferencia de la anterior, pone en evidencia cambios significativos en la asociación de arcillas a pesar de que se trata de la misma muestra. (Figura 8b). El tratamiento ácido destru-

ye una parte de las arcillas 1:1, probablemente las más frágiles (de menor cristalinidad), que parecen haber sufrido un proceso de hidrólisis muy fuerte o fueron eliminadas en las aguas de lavado. Si se comparan los dos difractogramas (Figura 8, a y b), se observa que el tratamiento térmico a 500 °C deja un pico intenso a 7Å que indica la concentración de un mineral de clorita, y la pérdida selectiva de una parte de las arcillas 1:1.

La muestra separada por gravedad permitió obtener una fracción superior más liviana (SS) y una más pesada (SI).

En la primera (Figura 8c), es evidente el predominio de las arcillas 1:1 y de un interestratificado 10-14 Sm, de carácter más esmectítico, por la banda ancha e intensa hacia 14Å. Por el contrario la illita está presente en muy baja proporción y la clorita no aparece en esta fracción. Es muy notable que la suspensión superior no contiene hierro de acuerdo con los análisis químicos, lo que indica que las arcillas más livianas (1:1 y 10-14Sm) están desprovistas de este elemento (Tabla 1).

La fracción inferior (SI) es muy parecida a la suspensión tratada con HCl. En este caso, la separación por gravedad elimina las arcillas más livianas que quedan en la parte superior, y concentra las arcillas 1:1 mejor cristalizadas, un interestratificado 10-14Sm más illítico que el de la otra fracción (banda más intensa hacia 10Å), cloritas e illitas en la fracción más pesada (Figura 8d).

Conclusiones

El trabajo se enfocó al estudio de la interacción roca-suelo-agua, por medio de herramientas geoquímicas y mineralógicas, con el fin de entender la dinámica de los procesos de erosión. Los resultados mostraron que en la región de Checua se produce el transporte activo de materiales de la cuenca a partir de las rocas aflorantes, lo que ha generado acumulaciones de sedimentos, paleosuelos y suelos sucesivos, durante la formación de los paisajes actuales.

Los trazadores geoquímicos más efectivos para evaluar el origen de los materiales fueron los elementos traza Ni, Cu y Zn, que muestran un contraste entre suelos cuyo material de origen es el sedimento depositado en el centro del valle, mientras que otros parecen tener un origen ligado a otras rocas fuente, arcillosas y cuarcíticas, y a cenizas volcánicas llegadas por vía eólica.

En los suelos se identificaron varios procesos ligados a las variaciones climáticas ocurridas durante la última glaciación y el Holoceno: translocación de arcillas por contraste climático húmedo / seco dentro de los perfiles,

Tabla 2. Análisis de aguas

Determinación	1	2	3	4	5	6	7	8
Conductividad específica a 25°C, micromhos/cm	95.9	91.7	84.9	98.9	138.0	128.0	82.9	211
Dureza total (Ca,Mg) como CaCO ₃ mg/L	28.8	21.4	57.3	19.1	43.2	23.8	19.0	40.0
pH potenciométrico a 18°C	7.09	6.81	7.01	6.85	7.11	7.81	7.17	7.10
Sólidos totales (evaporación 105°C) mg/L	208	842	1612	405	2676	468	1984	4103
Sólidos en solución (evaporación 105°C mg/L)	174	176	991	159	498	262	374	113
Sólidos en suspensión, mg/l	34	666	621	246	2178	206	1610	1820
Turbiedad, NTU	288	1830	2146	813	1500	100	1000	1820
Localización	Checuita	Río Checua	Hoyos Hondos	Puente Checua	Checuita	Checua	Checua	Finca Checua
Fecha	5/10/99	5/10/99	5/10/99	5/10/99	10/11/99	10/11/99	30/11/99	09/06/00

formación de nódulos de óxido de hierro por cambios en los niveles freáticos, procesos de carbonatación bajo climas muy secos.

Los sedimentos y los suelos se caracterizan por un mismo tipo de asociación de arcillas: arcillas 1:1, tipo caolinita, con diferentes grados de cristalinidad; interestratificados 10-14Sm, que varían entre el polo más esmectítico y el polo más illítico; illitas y finalmente cloritas ferruginosas. Estas asociaciones están indicando también la filiación entre rocas, sedimentos y suelos en la región.

Los resultados ponen en evidencia el comportamiento divergente de las arcillas en cuanto a su movilidad en suspensión: las aguas de drenaje llevan principalmente minerales 1:1 e interestratificados 10-14Sm esmectíticos, que son arcillas finas, mal cristalizadas y frágiles. En contraste, las arcillas 1:1 bien cristalizadas, los interestratificados 10-14Sm illíticos, las illitas y las cloritas, corresponden a minerales de mayor tamaño y probablemente menor carga de superficie, que poseen menor movilidad y mayor resistencia a la alteración.

Los trabajos de control de erosión han sido efectivos para la disminución de los aportes de sedimentos al sistema de drenaje. Sin embargo, la explotación de arcillas expone materiales sensibles a la erosión y revierte los procesos de recuperación de la cuenca. Se recomienda estudiar los mecanismos para detener estos procesos, con base en el conocimiento de la estructura y las propiedades de los minerales arcillosos, para buscar formas de control al transporte aprovechando las propiedades de floculación en condiciones fisicoquímicas apropiadas.

Bibliografía

- Cárdenas, S.**, 1988 "Proyecto control de erosión en la Cuenca del río Checua" CAR – KFW- GTZ.
- Duarte, R.**, 1997. Resultados preliminares de la relación entre la mineralogía de los sedimentos y la erosión en el valle del río Checua, Ingeominas, Bogotá 14 p.
- Dydynski, K., & Gómez, J.**, 1988 "Evaluación de los beneficios indirectos originados por el proyecto CAR – GTZ – KFW control de la erosión Cuenca del Río Checua" CIDER, 93 p.
- Fölster H, & Hetsch, W.**, 1978. "Paleosols Sequences in the Eastern Cordillera of Colombia. Quaternary Research 9: 238-248.
- Gaviria S.**, 2002. "Génesis y alteración de arcillas en rocas y sedimentos Cuaternarios de la Sabana de Bogotá y la Cuenca de Fúquene: relación con los procesos de erosión". Proyecto de desarrollo científico tecnológico Sena-Colciencias, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia.
- Gaviria S.**, (ed)., 1997 "Geoquímica y mineralogía de sedimentos y suelos asociados en la Sabana de Bogotá". Informe de Proyecto P96Q01, Ingeominas, Bogotá 115 p.
1993. "Evolution minéralogique et géochimique du fer et de l'aluminium dans les sols ferrallitiques hydromorphes des Llanos Orientales de Colombie. Les états précoces du cuirassement". Tesis de Doctorado, Universidad de Nancy, Francia, 216p. + 6 anexos
- Gaviria, S., Duarte R., Romero F., Thorez J., & Berrío I., C.**, 2004. "Procesos de erosión, transporte y depósito durante el Cuaternario." En Aspectos geoambientales de la Sabana de Bogotá. Publicación Especial No 27, Ingeominas, Bogotá, 169-217 p.
- Helmens K. K.**, 1990. Neogene – Quaternary geology of the high plain of Bogotá, Eastern Cordillera, Colombia. Dissertations Botanicae J. Cramer, Vaduz, 79: 368 pp.

- Henninger, J., Moosbrugger, W.**, 1987. "El proyecto control de erosión en la Cuenca del Río Checua. Convenio Colombo – Aleman, Bogotá.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC**, 2000. Estudio General de Suelos, zonificación de tierras del Departamento de Cundinamarca, Tomo II, Hoja No 209.
- Mac Laughlin & Arce**, 1975. "Geologic map of the Zipaquirá Quadrangle (K-11), Colombia, Ingeominas, Miscellaneous Investigations Series, U.S. Geological Survey.
- Macia & Calvache**, 1987. Consideraciones acerca de la erupción del volcán Nevado del Ruiz (13.11.85) con base en el análisis de las cenizas volcánicas. *Geología Colombiana*, 16,7 -15.
- Malagón D., Pulido C., & Llinás R.**, 1990. Paleosuelos del piso alto andino en la región montañosa circundante a Bogotá. *Investigaciones, Subdirección Agrológica Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Vol 2, No 2.*
- Soil Survey Staff**. 1990. Keys to soil taxonomy. Soil managment Support services, Blacksburg, Virginia, Monograph 13, 422 pp.
- Thomas, W.** 1976. Laboratorio Minero Central de Análisis Geoquímico. Laboratorio Químico Nacional, Ingeominas. Bogotá, 27-50.
- Thorez, J.**, 1976. Practical clay identification of clay minerals. De. G. Lelotte. Belgique.
- Van der Hammen, Th**, 1995. La última glaciación en Colombia. En: Plioceno y Cuaternario del altiplano de Bogotá y alrededores. *Análisis Geográfico Instituto, Geográfico Agustín Codazzi*, 24: 69-89.
- Van der Hammen, Th & Hooghiemstra H**, 1995. Cronoestratigrafía y correlación del Plioceno - Cuaternario en Colombia. En: Plioceno y Cuaternario del altiplano de Bogotá y alrededores. *Análisis Geográfico, Instituto Geográfico Agustín Codazzi*, 24:51-68.
- Vanegas, J.**, 1988 "Predicción cuantitativa de la pérdida de suelo por erosión pluvial" (Cuenca del Río Checua) *Soc. Colombiana de Ciencias Suelo*. 18 (2): dic. P. 105 –111.
- Ortiz, A.**,1980. "Estudio de desarrollo y manejo integral de la Cuenca del Río Checua" Tomo IA – IIA. CAR.

Recibido el 20 de febrero de 2003

Aceptado para su publicación el 14 de octubre de 2004