
PATRONES E ÍNDICES DE METEORIZACIÓN QUÍMICA DE LOS DEPÓSITOS DE VERTIENTE Y ROCAS FUENTES EN EL VALLE DE ABURRÁ

CHEMICAL WEATHERING TREND AND INDEX OF HILLSLOPE DEPOSITS AND BEDROCK SOURCE IN THE ABURRÁ VALLEY

Edier Aristizábal¹, Barry Roser² & Shuichiro Yokota²

1. Subdirección Ambiental, Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Colombia.

2. Departamento de Geociencias, Universidad de Shimane, Matsue, Japón.

edieraristizabal@gmail.com

Recibido para evaluación: 30 de Abril de 2009 / Aceptación: 15 de Mayo de 2009 / Recibida versión final: 29 de Mayo de 2009

RESUMEN

Los procesos de meteorización química en los depósitos de vertiente del valle de Aburrá y sus respectivas rocas fuentes han sido estudiados a través de análisis de fluorescencia y difracción de rayos X con el objeto de evaluar y cuantificar los perfiles de meteorización, su composición y mineralogía. El Índice Químico de Alteración (CIA), la Pérdida por Ignición (LOI) y el Índice Móvil (Imob) fueron utilizados para cuantificar el grado de meteorización de los depósitos de vertientes y la roca fuente. Los patrones de meteorización fueron analizados utilizando los diagramas A-CN-K y A-CNK-FM. Las vertientes del valle de Aburrá están caracterizadas por una larga e intensa historia de meteorización y movimientos de vertientes sucesivos. La meteorización química de sus materiales se caracteriza por el desarrollo de minerales de arcilla (caolinita, halloisita) y sesquióxidos de hierro y aluminio. Procesos de lateritización caracterizan las últimas fases de meteorización. Las concentraciones de CaO, Na₂O y K₂O se reducen considerablemente en los productos de la meteorización comparados con la roca parental, y por el contrario las concentraciones de Al₂O₃, Fe₂O₃, y MgO incrementan. Los valores de CIA en las muestras de matriz de los depósitos independiente de sus respectivas rocas fuentes se encuentran alrededor de 100, en tanto que los valores en los bloques de los depósitos y en el saprolito tienen valores más bajos. Diferentes patrones de meteorización se observan en los diagramas A-CN-K para cada grupo litológico validando la correlación entre los depósitos de vertiente y la roca parental. Los índices de meteorización química presentan inconsistencia para algunas muestras fuertemente influenciadas por la presencia de sesquióxidos, presentando valores altos de LOI y bajos de CIA, y adicionalmente con patrones anómalos de enriquecimiento en el diagrama A-CNK.FM. Los resultados obtenidos sugieren que las condiciones tropicales en el valle han dominado por un largo tiempo, permitiendo la formación de productos con altos índices de meteorización en las matrices de los depósitos independiente de su fuente. Las condiciones prolongadas de humedad y pluviosidad se considera que pueden ser las responsables de la meteorización y movilización de los grandes depósitos de vertiente que caracterizan el valle.

PALABRAS CLAVES:

Geoquímica, Meteorización tropical, Índices de meteorización, Depósitos de vertiente, Valle de Aburrá, Colombia.

ABSTRACT

Tropical chemical weathering of the Aburrá hillslope deposits and their respective bedrock were examined using X-ray fluorescence and X-ray diffraction analyses to document and quantify their chemical weathering profiles, compositions, and mineralogical properties. The Chemical Index of Alteration (CIA), Loss on Ignition (LOI), and the Mobiles Index (Imob) were used to quantify the degree of weathering of hillslope deposits and bedrock source. Weathering patterns were analyzed using A-CN-K and A-CN-K-FM diagrams.

The materials mantling the slopes in the Aburrá Valley record an intense weathering history. Chemical weathering is characterized by increased development of clay minerals (kaolinite, halloysite) and iron and aluminum sesquioxides. Lateritization characterizes the final stage of the weathering profiles. Concentrations of CaO, Na₂O, K₂O decrease markedly in the weathering products compared to the fresh bedrock source, whereas concentrations of Al₂O₃, Fe₂O₃, and MgO increase significantly. CIA ratios of matrix slope deposits derived from all four sources near 100, whereas those of boulder slope deposits and saprolites are lower, and intermediate to fresh rock values. Different A-CN-K weathering paths are evident for each lithotype validating the correlation established between the hillslope deposits and their various parents. Chemical weathering indices in some samples are strongly influenced by the presence of sesquioxides, as reflected by high LOI, anomalously low CIA, and varying enrichment patterns on the A-CN-K-FM diagrams.

The overall results suggest that tropical conditions have dominated for a long time in the Aburrá Valley, leading to uniformly high weathering indices in matrix slope deposits irrespective of parent materials. Prolonged warm and humid conditions could thus be responsible for the weathering and mobilization of extensive old hillslope deposits during the Quaternary.

KEY WORDS: Geochemistry, Tropical weathering, Weathering indices, Hillslope deposits, Aburra Valley, Colombia.

1. INTRODUCCIÓN

La meteorización química es un proceso dominante en regiones tropicales húmedas, que favorece los procesos de laterización y formación de profundos perfiles de meteorización (Irfan, 1996; Voicu & Bardoux, 2002). Como resultado de los procesos de meteorización las propiedades mecánicas de los suelos son modificadas, aumentando las condiciones de inestabilidad en las vertientes, de tal forma que los movimientos en masa generalmente ocurren en materiales fuertemente meteorizados (Yokota & Iwamatsu, 1999; Ng et al., 2001; Arel & Tugrul, 2001; Rahardjo et al., 2004; Moon & Jayawardane, 2004).

Los índices de meteorización generados a partir de análisis cuantitativos de la composición química de los productos de la meteorización son comúnmente utilizados para caracterizar tanto la intensidad como los mecanismos de meteorización [Nesbitt & Young, 1982; Irfan, 1996; Irfan, 1999; Ng et al., 2001; Gupta & Rao, 2001; Voicu & Bardoux, 2002]. Recientes investigaciones proponen que índices de meteorización basados en la relación entre óxidos móviles contra óxidos inmóviles son parámetros muy útiles para caracterizar los cambios inducidos por la meteorización (Duzgoren et al., 2002). Adicionalmente los elementos más móviles durante los procesos de meteorización son más efectivos para la cuantificación de la meteorización química en materiales residuales heterogéneos (Price & Velbel, 2003).

Nesbitt y Young (1982, 1984, 1989) y Nesbitt et al. (1996) propone utilizar diagramas A-CN-K y A-CN-K-FM para evaluar los patrones y patrones de meteorización. Estos autores han demostrado que sin importar la diversa composición de las rocas los procesos de meteorización siguen tendencias simples y comunes que no son afectados por las condiciones climáticas bajo las cuales se originaron. Con respecto al grado de meteorización proponen utilizar el diagrama A-CN-K, en el cual se puede evaluar el patrón de meteorización desde la roca fresca hasta los últimos productos de meteorización (Fedo et al., 1995). La mayoría de los trabajos en este sentido se han concentrado en evaluar los cambios geoquímicos y geomecánicos que sufren los perfiles de meteorización de las rocas fuentes; solo algunos pocos trabajos han tratado de correlacionar los procesos de meteorización y los depósitos de vertiente (Mcfadden, 1988; Modenesi-Gauttieri, 1996).

Los resultados de esta investigación han permitido estudiar los patrones de meteorización, la intensidad de los procesos, y el comportamiento químico de los minerales mayores y la mineralogía en los depósitos de vertiente en el valle de Aburrá y relacionarlos con las rocas fuentes que originaron dichos depósitos. La caracterización de los perfiles de meteorización de la roca parental y los depósitos de vertiente, es una herramienta muy útil que permite identificar los procesos y las condiciones paleo climáticas que originaron estos perfiles, y de esta forma tratar de entender la evolución geomorfológica del valle de Aburrá y del norte de los Andes Colombianos, y el papel que ha jugado en la configuración actual del valle la ocurrencia de los movimientos en masa.

2. MARCO GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO

El valle de Aburrá, con un área de 1152 km² y una longitud de 65 km, está localizado en el norte de la cordillera Central. Las condiciones climáticas son típicas de ambientes tropicales, con una temperatura promedio de 22° C, y humedad relativa de 70 %. Las condiciones de lluvia son bimodales, con máximas de lluvia en los meses de mayo y octubre. Los promedios de lluvias anuales varían desde 1400 mm en la parte central hasta los 2300 mm en el norte y sur del valle. Morfológicamente, el valle de Aburrá es definido por Arias (2003) como una depresión con orientación sur-norte de fondo plano y limitado por respaldos laterales muy inclinados en roca y cubiertos en la parte baja por flujos de lodos.

Geológicamente, el norte de la cordillera Central está compuesto de un basamento metamórfico paleozoico, rocas ígneas ultrabásicas, una secuencia volcano - sedimentaria, cuerpos graníticos intrusivos y depósitos de vertiente y aluviales Maya & González (1995). El basamento metamórfico, conformado esencialmente por secuencias intercaladas de esquistos, anfíbolitas y gneises, ha sido obducido durante el cretácico por cuerpos alargados de composición dunítica, basaltos y sedimentos de origen marino, fuertemente afectados tectónicamente (Restrepo & Toussaint, 1984).

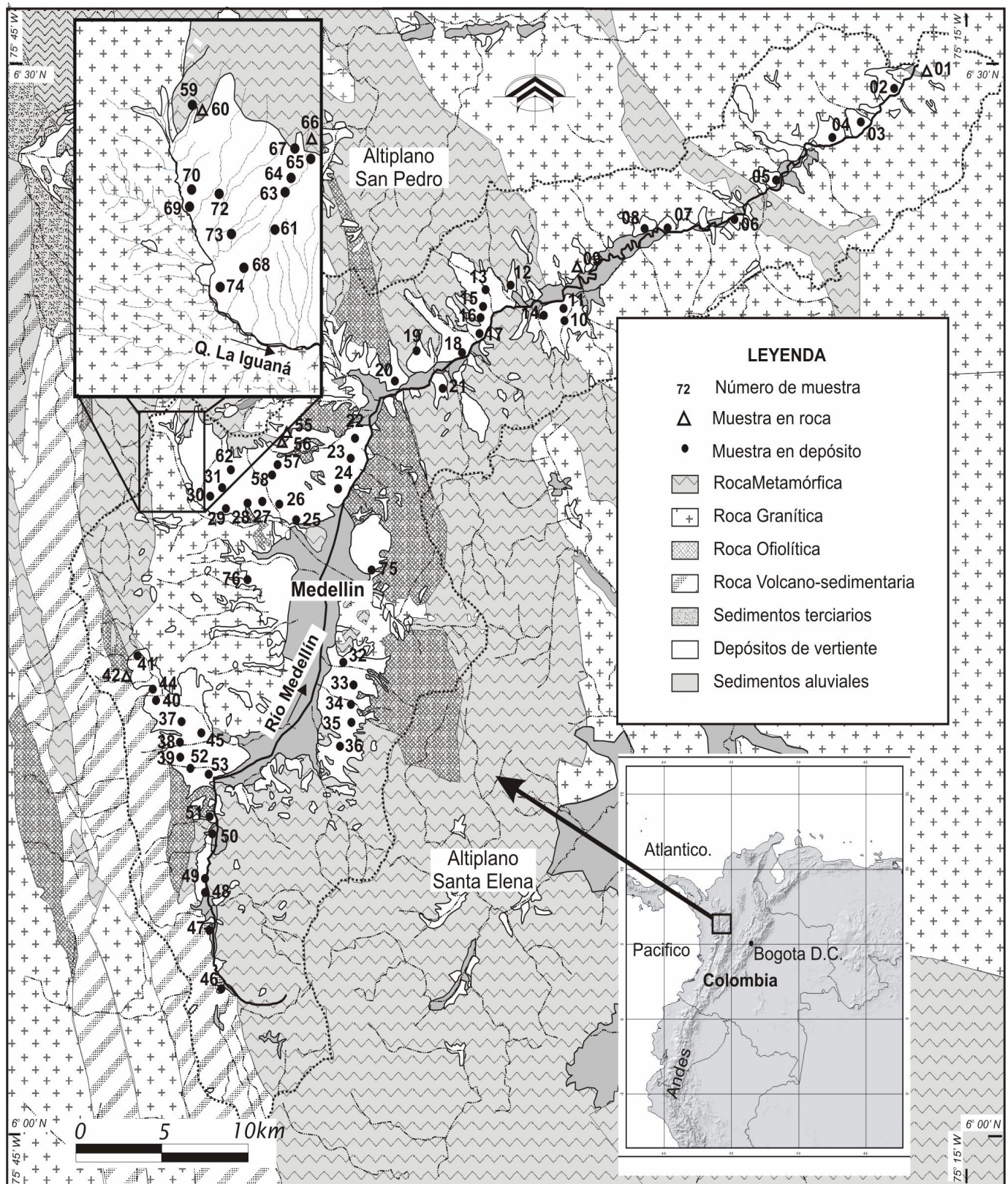


Figura 1. Mapa geológico simplificado del valle de Aburrá. La línea discontinua marca el borde de la cuenca. Se presenta además la localización de las muestras analizadas

Adicionalmente, tonalitas y granodioritas cretácicas y triásicas de composición ácida a intermedia, intruyen este cuerpo metamórfico (McCourt et al., 1984). La Figura 1 muestra el mapa geológico del valle de Aburrá y los depósitos de vertiente asociados al origen y conformación del valle.

La región del valle ha sido tectónicamente activa por millones de años (AMVA-GSM, 2002). Anomalías en los drenajes y zonas de cizalla han sido reportadas en la última década, reflejando reciente actividad tectónica a lo largo de los sistemas estructurales principales (AMVA-GSM, 2002; Ortiz, 2002; Yokota & Ortiz, 2003). Uno de los principales sistemas de fallas regionales que afectan el valle de Aburrá es el Sistema Romeral, con evidencias regionales de movimientos dextrales y sinistral (Ego & Sebrier, 1995)), y dirección NNW- SSE.

Espesos depósitos derivados de antiguos movimientos en masa, y clasificados como producidos por flujos y deslizamientos de escombros y lodos cubren la parte media y baja de las laderas (Aristizábal & Yokota, 2006). Estos depósitos se caracterizan por tener una matriz limo arcillosa, de color café rojiza a naranja, soportando fragmentos de composición heterogénea y que varían en tamaño desde gravas hasta bloques de diámetros métricos.

Las rocas y depósitos en general presentan espesos perfiles de meteorización. Las profundidades de los perfiles varían significativamente dependiendo de la roca parental y las condiciones locales. En las rocas graníticas, los perfiles de meteorización se caracterizan por colores amarillo rojizos (10YR 7/4) que sobrepasan los 30 m de profundidad. El perfil de meteorización desarrollado de rocas ultra básicas y metamórficas es delgado, variando entre 10 y 20 m de profundidad, generalmente de color rojo anaranjado (7.5 YR 7/6), con fragmentos de roca intensamente meteorizados en general.

3. METODOLOGÍA

Alrededor de 100 muestras fueron colectadas a lo largo del valle de Aburrá. Las muestras incluyen matriz y bloques de depósitos de vertiente, saprolitos y roca fuente. Las muestras fueron agrupadas por roca fuente, de acuerdo con criterios de campo, con el fin de comparar los materiales de meteorización de los depósitos de vertiente y la roca fuente. Las muestras fueron divididas en cuatro grupos litológicos considerados por el autor: (1) fuente graníticas, (2) fuente volcánico - sedimentarias (3) origen ofiolítico; y (4) fuente metamórfica.

Diferentes métodos para evaluar y cuantificar los perfiles de meteorización, composición y mineralogía, entre ellos análisis de fluorescencia por rayos-X (XRF), y análisis de difracción por rayos-X (XRD) fueron aplicados.

Las muestras se prepararon en los Laboratorios de la Universidad Nacional de Colombia (Medellín), y todos los análisis fueron adelantados en los laboratorios del Departamento de Geociencias de la Universidad de Shimane (Japón). El procedimiento de la preparación de las muestras es descrito por Roser et al. (1998). El método analítico, las condiciones instrumentales y la calibración del método es descrito por Kimura & Yamada (1996).

3.1. Elementos mayores

El comportamiento de la meteorización a partir de los óxidos en los depósitos de vertiente y roca fuente en el valle de Aburrá está generalmente caracterizado por el enriquecimiento de Al_2O_3 , Fe_2O_3 , y TiO_2 , y el empobrecimiento de CaO , Na_2O , K_2O , SiO_2 , MgO y MnO . La mayoría de las muestras, desde fuentes graníticas hasta volcánico sedimentaria, presentan patrones lineales, en tanto las fuentes ofiolíticas y metamórficas presentan mayor dispersión de los datos, especialmente para Fe_2O_3 y CaO .

La variación en los diagramas de óxidos para fuentes graníticas muestra que los protolitos frescos tienen un contenido anhídrido de Al_2O_3 del 17% en peso, mientras que los máximos valores para los productos de la meteorización están cerca al 30%. El TiO_2 forma un patrón lineal. Los óxidos de MnO y MgO muestran una débil correlación negativa con el Al_2O_3 , variando de 0.02 % MnO y 0.25 % MgO en muestras meteorizadas, a 0.1 % MnO y 1.7 % MgO en muestras frescas. El SiO_2 presenta una correlación negativa con el Al_2O_3 . Los contenidos de Fe_2O_3 muestran una correlación positiva y muy fuerte con Al_2O_3 , los datos varían desde 4.72 % en rocas frescas de tonalitas hasta casi el 11 % en la matriz y saprolitos (Figura 2).

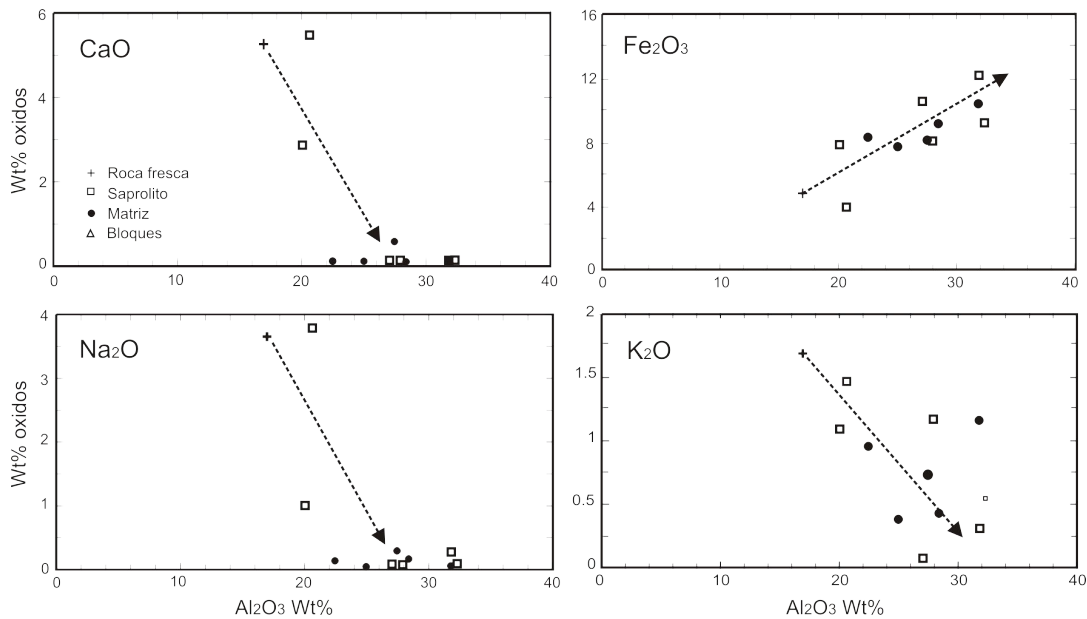


Figura 2. Diagramas de variación de elementos mayores en los perfiles de meteorización de rocas graníticas

Los materiales analizados de fuentes volcano sedimentarias muestran patrones de óxidos comparables con los resultados de fuentes graníticas. Las muestras de basaltos frescos y bloques de depósitos tienen altos contenidos de CaO, Na₂O, y MgO comparados con los materiales meteorizados. Los contenidos de SiO₂, CaO, Na₂O, MgO y MnO muestran correlaciones negativas con el Al₂O₃, mientras el TiO₂ y Fe₂O₃ tiene una correlación positiva. El contenido de Al₂O₃ varía de 14-18 % en los materiales fuente hasta 30 % en los productos de la meteorización. Los contenidos de Fe₂O₃ varían desde 6.4 % en basaltos frescos hasta 20% en la matriz de los depósitos (Figura 3).

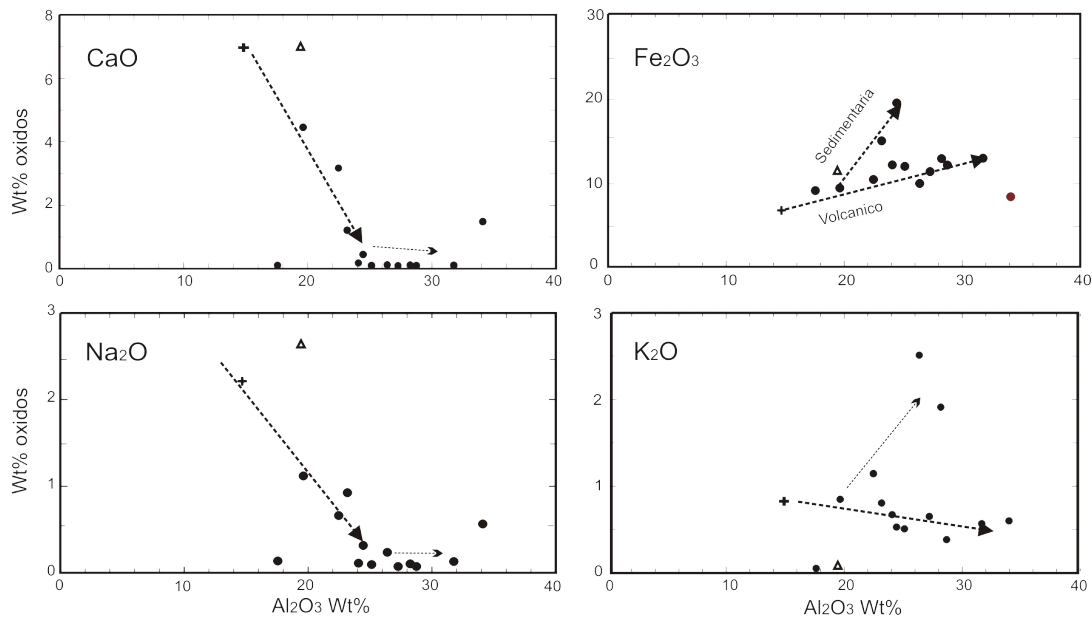


Figura 3. Diagramas de variación de elementos mayores en los perfiles de meteorización de rocas volcano sedimentarias. Muestras de fuentes ofiolíticas no presentan una correlación lineal entre óxidos, pero en general los patrones son similares a los obtenidos de rocas graníticas y volcano sedimentarias. El Al₂O₃ varía entre 7 % en los depósitos de

vertiente hasta 53 % en muestras de metagabros; la mayoría de muestras de matrices tienen mayores contenidos de aluminio (25-32%) que las rocas fuentes. Los contenidos de SiO₂ son generalmente bajos y uniformes (35-50 %). Los contenidos de CaO, Na₂O, K₂O y MgO tienden a disminuir en las muestras de matriz de los depósitos comparados con los materiales fuente. En contraste los contenidos de Fe₂O₃ en las matrices tienden a aumentar comparados con la roca fresca y los bloques en los depósitos (Figura 4).

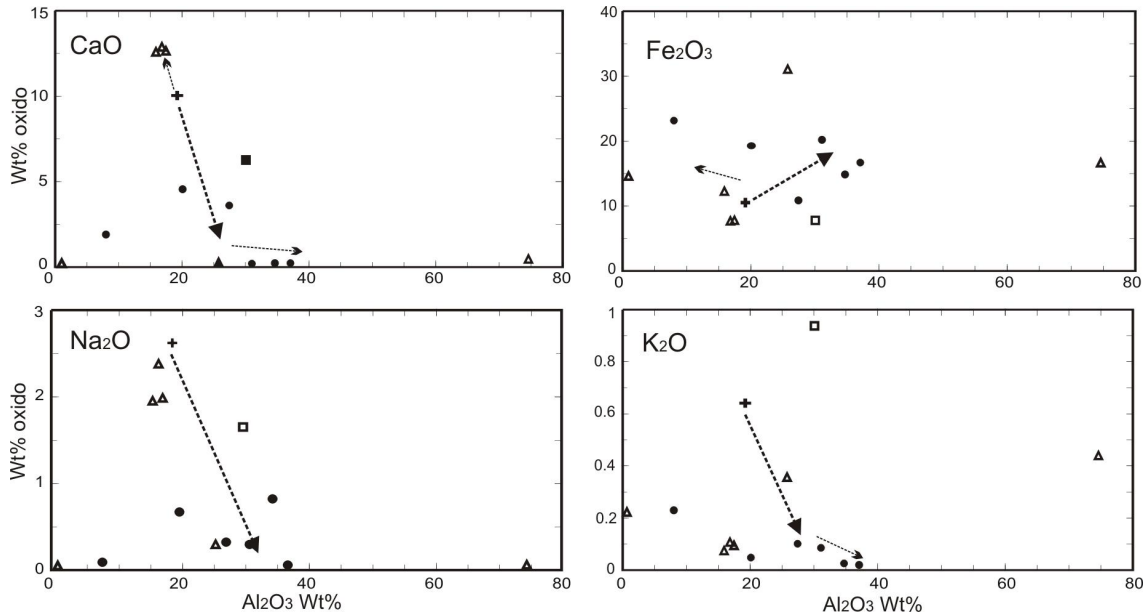


Figura 4. Diagramas de variación de elementos mayores en los perfiles de meteorización de rocas de origen ofiolítico

Para las fuentes metamórficas los contenidos de Al₂O₃ tienden a caer en un rango reducido (15-20 %). El contenido de SiO₂ de las rocas fuentes es intermedio (40-56 %), en tanto que las muestras de matriz tienen contenidos mayores entre 31-62 %. En las muestras de matriz los contenidos de CaO, Na₂O y MgO tienden a reducirse fuertemente comparados con las fuentes. Los contenidos de Fe₂O₃ de la roca fuente y matriz muestra una correlación positiva con el Al₂O₃. En contraste de las rocas granítica y volcánico sedimentarias los contenidos de K₂O en las rocas metamórficas en la roca fuente y la matriz de los depósitos es bajo (Figura 5).

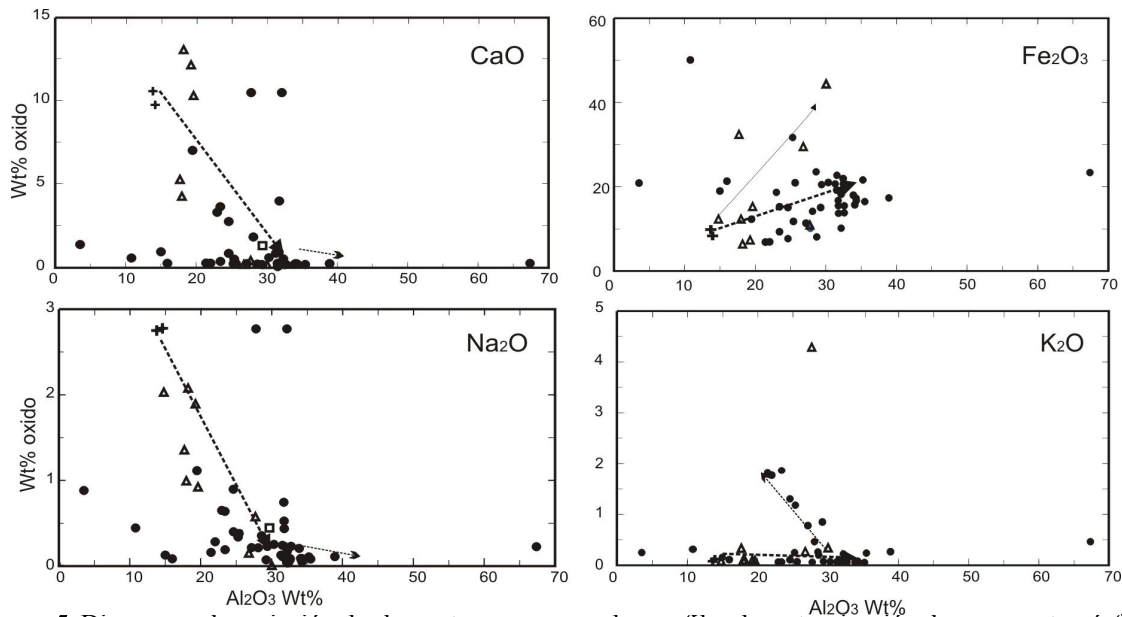


Figura 5. Diagramas de variación de elementos mayores en los perfiles de meteorización de rocas metamórficas

3.2. Análisis de los patrones de meteorización

La degradación del feldespato y la formación de minerales de arcilla son los procesos dominantes durante la meteorización química de la parte alta de la corteza. El calcio, el sodio y el potasio son generalmente removidos de los feldespatos, incrementando la proporción de alúmina y álcalis en los productos de la meteorización (Nesbitt & Young, 1982).

Los diagramas A-CN-K son utilizados para evaluar la composición de rocas ricas en plagioclasa fresca y feldespato potásico, y examinar los patrones de meteorización y sus productos, los minerales de arcilla (Nesbitt & Young, 1984, 1989; Nesbitt et al., 1996). Las muestras más intensamente meteorizadas aparecen en la parte alta del diagrama, reflejando la preponderancia de los minerales arcillosos de alúmina. La tendencia observada corresponde a una línea paralela al eje A-CN, debido a que la plagioclasa es más susceptible a la meteorización que los feldespatos potásicos, por lo que el Ca y Na se van empobreciendo en comparación con el K. Este patrón interseca el eje A-K una vez toda la plagioclasa ha sido eliminada, entonces el patrón de meteorización continúa hacia el vértice A, una vez que el K es extraído de los materiales residuales preferentemente al A.

La Figura 6 presenta los patrones de meteorización de las rocas fuentes y depósitos de vertiente en el valle de Aburrá, las muestras fueron diagramadas de acuerdo con la fuente, con el objeto de comparar los patrones de meteorización de acuerdo a la litología.

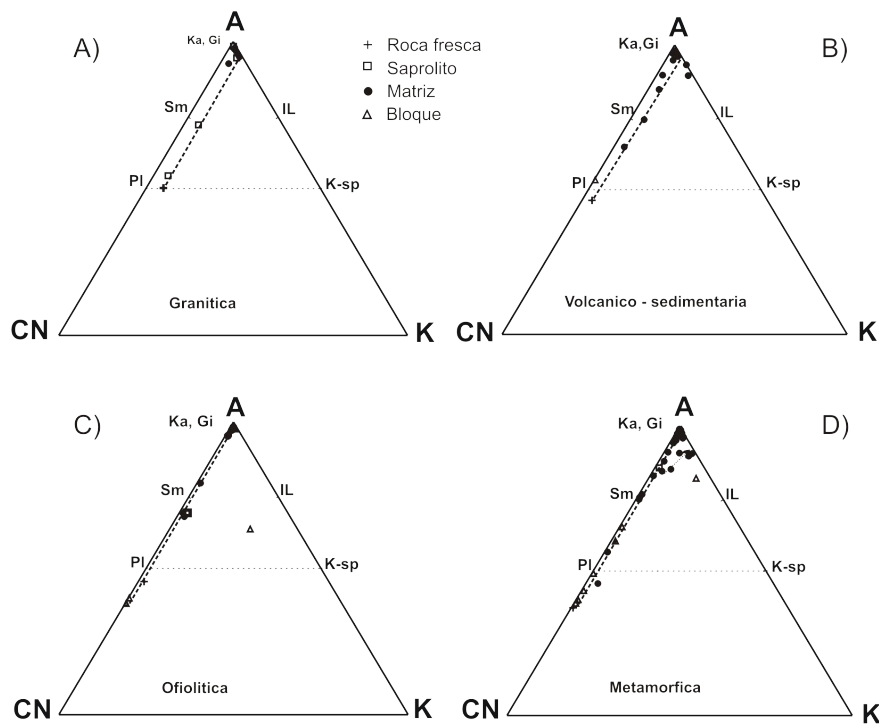


Figura 6. Diagramas A-CN-K ilustrando el patrón de meteorización de los depósitos de vertiente y rocas fuentes en el valle de Aburrá. A. Fuente granítica B. Fuente volcano sedimentaria. C. Fuente ofiolítica. D. Fuente metamórfica. La línea Plag-Ksp representa el eje de feldespatos. Pl = plagioclasa; Ksp = K-feldespato; Sm = esmectita; IL = illita; Ka = caolinita; Gi = gibbsita (Nesbitt and Young, 1984; 1989)

En general, los patrones de meteorización del valle de Aburrá son similares a los descritos por Nesbitt & Young (1984, 1989) alrededor del mundo. Las muestras de roca y bloques ligeramente meteorizados se ubican cerca de la línea de feldespatos; las muestras moderadamente meteorizadas, saprolito y matriz poco meteorizada caen en la parte media y alta del triángulo, y la mayoría de las muestras de matriz, bloques intensamente meteorizados y horizontes saprolíticos aparecen en la parte alta del diagrama. En general todas las muestras aparecen cerca del eje A-CN. Las muestras derivadas de rocas graníticas y volcano sedimentarias se localizan hacia el centro del triángulo, reflejando sus mayores

protolitos félsicos, en tanto que las muestras de fuentes metamórficas y ofiolíticas aparecen mas cercas del eje A-CN. La localización cerca del eje A-CN indica una mayor proporción de plagioclasa que de feldespatos potásicos.

En las fuentes de origen ofiolítico algunas muestras de roca fresca y bloques de depósitos se localizan por debajo de la línea de feldespato, reflejando los altos contenidos iniciales de CaO y Na₂O. Algunas de las muestras caen por debajo de la roca fresca evidenciando un leve enriquecimiento de CaO (+3.1-3.4 %) comparado con la roca parental. Los patrones de fuentes ofiolíticas no intersecan el eje A-K reflejando bajos contenidos iniciales de K en el protolito.

Las muestras de fuentes metamórficas aparecen cerca del eje A-CN, sin embargo algunas presentan tendencia hacia el eje A-K reflejando enriquecimiento de K, posiblemente debido a procesos de ilitización secundaria (Fedo et al., 1995). Muestras de roca y bloques frescos se localizan por debajo de la línea de feldespatos evidenciando el carácter máfico y altos valores iniciales de CaO y Na₂O.

Debido a que MgO y Fe₂O₃ son potencialmente móviles en ambientes tropicales es muy importante evaluar el comportamiento químicos de estos compuestos en los perfiles de meteorización. Nesbitt & Young (1989) introdujeron el diagrama A-CNK-FM para ilustrar la relación entre los minerales leucocráticos y melanocráticos constituyentes del perfil de meteorización.

Los diagramas A-CNK-FM para las diferentes rocas fuentes en el valle de Aburrá demuestran el enriquecimiento en MgO y Fe₂O₃ dentro del perfil de meteorización derivado de rocas metamórficas y ofiolíticas (Figura 7). La tendencia general de los perfiles de meteorización se encuentra a lo largo de la línea entre feldespato (Fel) y el vértice FM, donde los valores de las muestra de matriz y saprolitos están desplazadas hacia el eje A-FM y el vértice A.

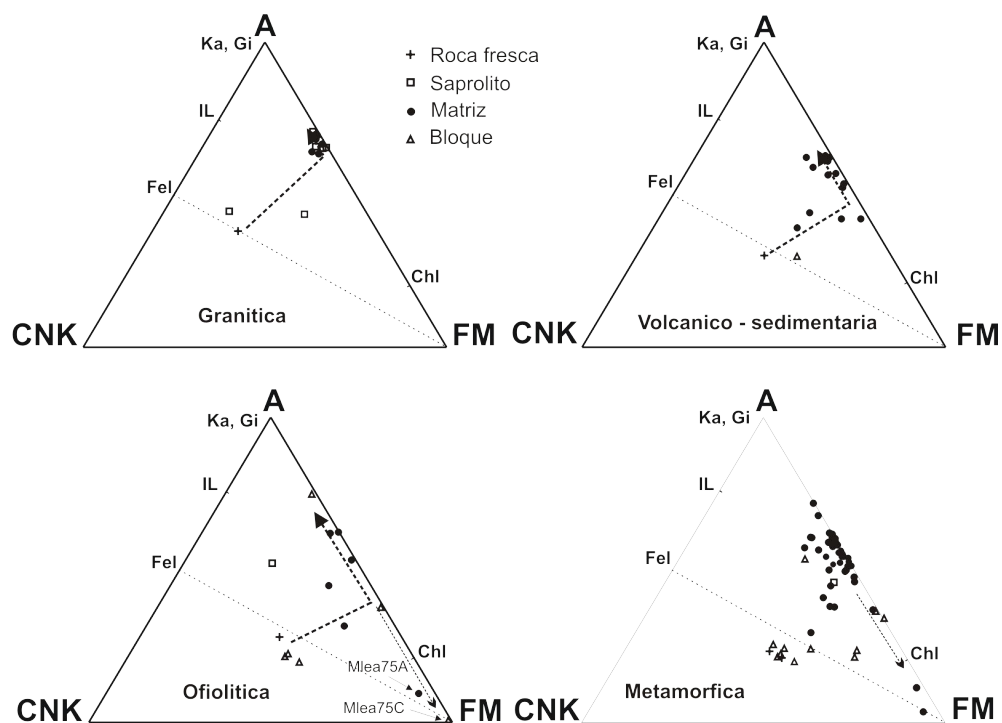


Figura 7. Diagramas A-CNK-FM ilustrando el patrón de meteorización de los depósitos de vertiente y rocas fuentes en el valle de Aburrá. A. Fuente granítica B. Fuente volcánico sedimentaria. C. Fuente ofiolítica. D. Fuente metamórfica. Fel = feldespato; Chl = clorita; IL = illita; Ka = caolinita; Gi = gibbsita (Nesbitt and Young, 1989; Nesbitt et al., 1996)

La fuente de los depósitos de vertiente es reflejada en los diagramas A-CNK-FM. Las muestras de tonalitas se localizan en la parte alta de la línea Fel-FM reflejando su relativa composición félsica. Las muestras de fuentes volcánicas aparecen a lo largo de la línea Fel - FM, con un patrón similar, en tanto las ofiolíticas y metamórficas caen mucho más cerca del vértice FM.

Las muestra derivadas de fuentes ofiolíticas presentan una mayor dispersión con desplazamientos hacia valores altos de MgO y Fe₂O₃ y también de Al₂O₃. Las fuentes metamórficas muestras patrones más consistentes.

En general las rocas frescas y bloques se localizan un poco por debajo de la línea Fel-FM, mientras las muestras de matriz aparecen a lo largo del eje A-FM. Los procesos de meteorización presentan un patrón sub paralelo al eje A-CNK, hasta interceptar el eje A-FM, y continuar a lo largo de este eje hacia el vértice de A.

Los diagramas A-CNK-FM sugieren que el Fe y Mg juegan un papel muy importante en los procesos de meteorización que afectan el valle de Aburrá, especialmente en los materiales derivados de rocas ofiolíticas y metamórficas. Estos dos elementos no presentan patrones regulares con el incremento de la intensidad de la meteorización, sugiriendo que estos dos grupos pueden ser ligeramente móviles bajo estas condiciones. Algunas muestras que se localizan lejos de los patrones generales presentan contenidos excepcionalmente bajos de Al₂O₃ y altos de Fe₂O₃ y MgO.

3.3. Análisis de la intensidad de meteorización

Nesbitt y Young [8] proponen como medida del grado de meteorización de los materiales de los perfiles el Índice Químico de Alteración (CIA, por sus siglas en inglés, chemical index alteration), basado en la proporción molecular:

$$CIA = \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O} \times 100$$

donde CaO* es la cantidad de CaO incorporado en la fracción de silicato de la roca. Asumiendo un comportamiento inmóvil del Al, cambios en el CIA reflejan cambios en la proporción de feldespatos y de varios minerales de arcilla desarrollados en los perfiles. Altos valores de CIA reflejan la pérdida de elementos móviles relativos a los constituyentes residuales estables durante la meteorización, y bajos valores de CIA indican la ausencia de alteración química [8]. Los valores del índice químico de alteración (CIA) son generalmente representados en diagramas A-CN-K. Donde el CIA corresponde a la proyección horizontal sobre una escala vertical que varía desde 0, el cual corresponde al eje A-CN, hasta 100, el cual corresponde al vértice A, donde la línea de feldespato tiene un valor de 50.

Las rocas y minerales frescos sin importar su composición tienen valores similares de CIA alrededor de 40-50, en tanto que muestras completamente meteorizadas tienen valores de CIA alrededor de 100 (Fedo et al., 1995).

Todas las muestras recolectadas en el valle de Aburrá se presentan en la Figura 8. En general las rocas tienen valores entre 38 a 60, incluyendo algunas ligeramente meteorizadas en depósitos de vertiente. Los saprolitos, bloques y matriz moderadamente meteorizada tienen relaciones entre 62 a 85, en tanto que las muestras de matriz y bloques completamente meteorizados y el saprolito tienen valores que varían desde 85 a 100. Valores anómalos se observan para las muestras enriquecidas en Fe₂O₃, MgO, y empobrecidas en Al₂O₃, al igual que en muestras enriquecidas en CaO. En general, el CIA presenta valores relativamente ordenados progresivamente desde bajos en las rocas fuente y muy altos para las muestras de matriz.

La Pérdida por Ignición (LOI por sus siglas en inglés Loss On Ignition) es otro importante parámetro que puede ser usado para evaluar la intensidad de la meteorización. Irfan (1999) propone el LOI como un buen indicador del grado de meteorización química. Dicho indicador fue adicionalmente utilizado para determinar el grado de meteorización de los materiales en el valle de Aburrá, ya que representa un parámetro independiente y adicional.

En general el valor de LOI aumenta con la intensidad de la meteorización. Valores de LOI desde 1 % en la roca a muestras con valores de 19 % en muestras de matrices.

Una relación lógica se observa entre el CIA y LOI (Figura 9), con ambos parámetros incrementando de acuerdo al grado de meteorización. Las rocas frescas se localizan en la parte baja con valores de LOI alrededor de 2 - 3 % y CIA de 40 - 50. Las rocas graníticas en general presentan valores mas bajos de LOI localizandose por debajo del patrón general observado. Las muestras de fuente ofiolítica y metamórficas tienen una gran dispersión hacia valores altos de LOI y CIA.

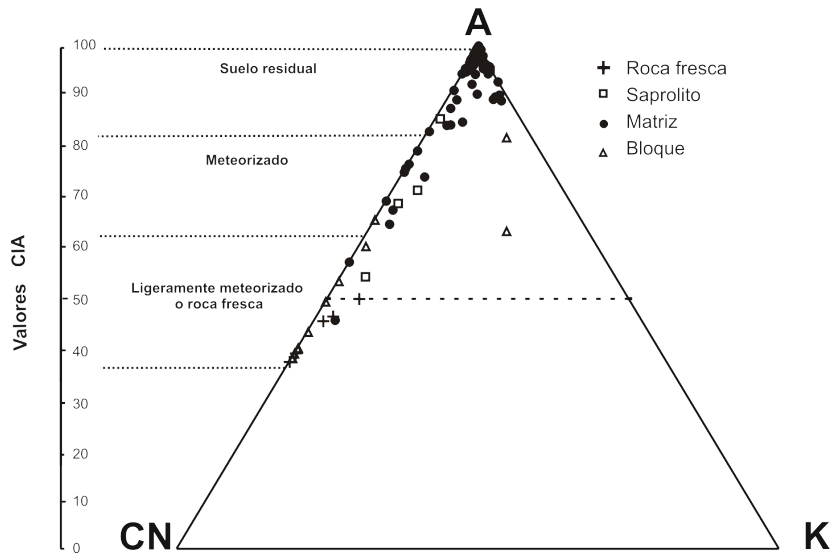


Figura 8. Diagrama A-CN-K ilustrando la intensidad de meteorización (valores CIA) de las muestras tomadas de depósitos de vertiente y rocas fuentes en el valle de Aburrá. El CIA es dividido en niveles simplificados del perfil de meteorización

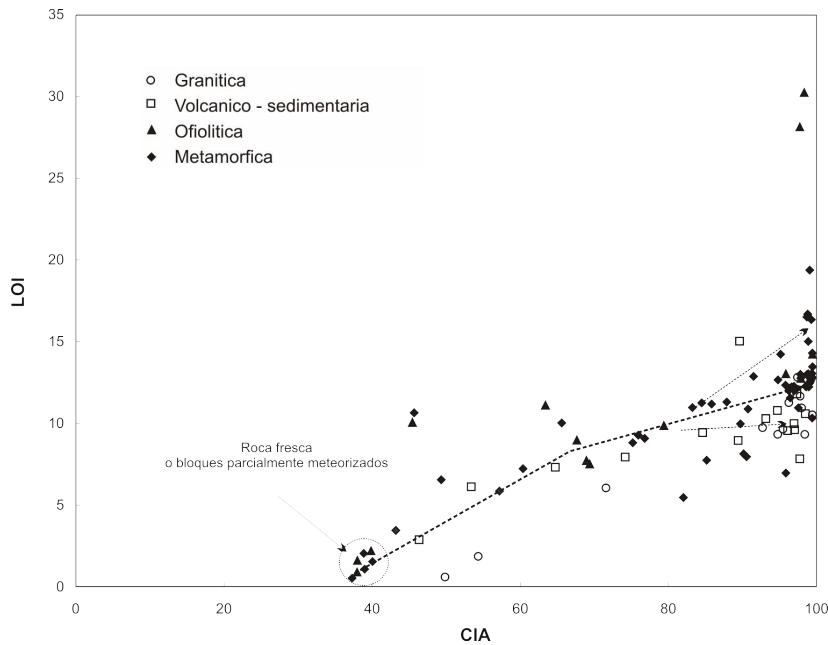


Figura 9. Índice Químico de Alteración (CIA) versus Pérdida por Ignición (LOI) para todas las muestras del valle de Aburrá por grupo litológico

Otro importante parámetro para valorar el grado de meteorización es introducido por Irfan (1996) denominado el Índice Móvil (Imob). Este índice está basado en la pérdida en CaO, Na₂O, y K₂O entre las rocas parentales y los productos de meteorización, llamado:

$$Mob = (K_2O + Na_2O + CaO) mole$$

$$\text{Índice Móvil (Imob)} = \frac{(Mob_{fresco} - Mob_{meteorizado})}{Mob_{meteorizado}}$$

donde Mob_{fresco} y $Mob_{meteorizado}$ son el contenido total ($K_2O + Na_2O + CaO$) en la roca fresca y meteorizada, respectivamente (1996). El índice móvil es definido como una relación molecular, donde el material meteorizado es normalizado contra la roca parental. Este índice considera solamente los elementos más móviles (K_2O , Na_2O , CaO), y provee valiosa información debido a que combina datos de ambos productos meteorizados y el material parental fresco.

El Índice Móvil es utilizado para determinar el grado de descomposición del contenido de feldespato en las rocas, particularmente para condiciones bien drenadas (Irfan, 1996). Para el caso del valle de Aburrá fueron utilizadas muestras estándares para cada una de las fuentes de los depósitos, las cuales se consideró representaban en promedio la composición de dichos grupos. Sin embargo se debe tener en cuenta que variaciones considerables son comunes dentro de estos mismos grupos de roca.

La Figura 10 muestra la correlación entre el índice móvil y el CIA para el valle de Aburrá. Las muestras de fuentes graníticas y volcánico sedimentarias se localizan a lo largo de un patrón lineal, y con valores un poco más altos de valores de CIA con respecto a las otras fuentes. Las muestras de fuentes metamórficas y ofiolíticas presentan un patrón discontinuo. La primera parte del patrón es lineal y con valores bajos de CIA comparado con las fuentes graníticas y volcánico sedimentarias, en tanto que la segunda parte del patrón es de mayor gradiente con valores de CIA ~ 60 y Imob 0.6, y posteriormente retoma el patrón general similar para todos los grupos de roca.

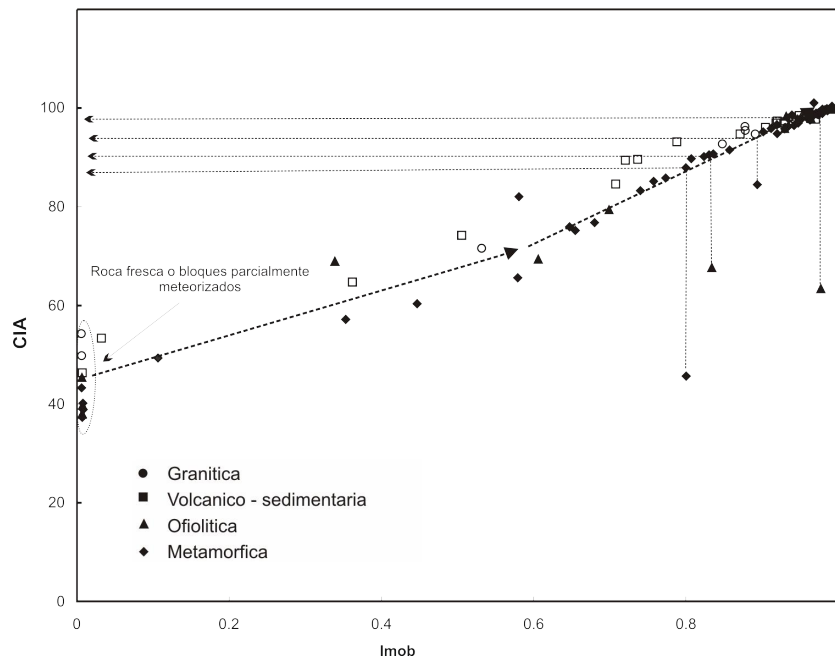


Figura 10. Índice Químico de Alteración (CIA) versus Índice Móvil (Imob) para todas las muestras del valle de Aburrá por grupo litológico

Las muestras con valores anómalos de Al_2O_3 , MgO , y Fe_2O_3 , que aparecen en la parte baja de la gráfica, lejos de los patrones generales observados, presentan sin embargo valores coherentes del Índice Móvil, ya que el Imob no considera los contenidos anómalos de estas muestras. Por lo tanto el patrón general mostrado por las rocas metamórficas y ofiolíticas pueden ser utilizado para determinar el valor hipotético de CIA para esta muestras, que corresponde a la intersección con su proyección vertical al patrón general, dando valores de 88 a 95%, que sugieren un estado de meteorización avanzado, en concordancia con sus altos valores de LOI.

3.4. Mineralogía de los productos de meteorización

La mineralogía dominante de estos productos de meteorización es cuarzo, caolinita y halloisita, y en las muestra derivadas de fuentes metamórficas y ofiolíticas también contiene óxidos de Mg, Mn, y Fe. Los minerales y hierro

tienen picos en XRD importantes en las fuentes metamórficas y ofiolíticas, indicando la presencia de hematita y goetita como resultado de la intensa meteorización química tropical. Todas las muestras analizadas contienen magnesio y óxidos de hierro. Los altos contenidos de MgO, CaO, y Na₂O en algunas muestras corresponden a la presencia de tremolita / actinolita y anortita. Altas concentraciones de MgO y empobrecimiento de Al₂O₃ se correlacionan con la presencia de clinocloro y clinocrisotila. Altas concentraciones de Fe₂O₃ en algunas muestras están asociadas con marcados picos de hematita y goetita, en tanto los altos valores de Al₂O₃ reflejan la presencia de gibsita en algunas muestras, tal como aquellas muestras con altos valores de LOI.

4. DISCUSIÓN

El grado de meteorización es uno de los factores más significantes que controlan el tipo y abundancia de los minerales de arcilla (Duzgoren et al., 2002). La meteorización tropical en el valle de Aburrá está caracterizada por la pérdida de CaO, Na₂O, y K₂O, y el enriquecimiento en Al₂O₃. Mineralógicamente estos cambios químicos reflejan la formación de minerales de arcilla secundarios, predominantemente caolín y halloisita. La halloisita es el primer mineral de caolín producido, y subsecuentemente cambia a caolinita de acuerdo al incremento del gradiente de meteorización (Irfan, 1996). La caolinita es formada en estados más avanzados de meteorización. La goetita y hematita son comunes en rocas meteorizadas y suelos residuales del valle de Aburrá y son las responsables de los colores amarillos y rojizos en los suelos.

La dispersión de las muestras provenientes de fuentes metamórficas y ofiolíticas sugiere un comportamiento, no solamente controlado por la intensidad de la meteorización, sino que puede también estar asociado con las variaciones composicionales debido a la intercalación de las secuencias metamórficas y también en las variaciones en la composición de las fuentes ofiolíticas (McCourt et al., 1984). Considerables variaciones han sido reportadas en la secuencia metamórfica y ofiolítica, lo cual puede ser sensibles parámetros para los perfiles de meteorización. Price & Velbel (2003) consideran que la segregación de minerales micáceos desde los tectosilicatos y el desarrollo de foliación durante el metamorfismo producen horizontes de composición química y mineralógica diferente, por lo tanto con susceptibilidades diferentes a la meteorización. Estas condiciones sugieren que los contenidos de óxidos tal como Al₂O₃, Fe₂O₃, y TiO₂ pueden no mantenerse constantes incluso teniendo en cuenta que usualmente son considerados como inmóviles.

Muchos autores han discutido el rol del Fe y Mg en los estudios de meteorización. Price & Velbel (2003) consideran que las concentraciones de hierro son más sensibles a las condiciones de reducción, lo cual puede no ser constante a lo largo del perfil. Consecuentemente los contenidos de hierro en los productos de meteorización pueden ser controlados por los niveles de las aguas subterráneas antiguos o actuales más que por el avance de la meteorización. Duzgoren-Aydin et al. (2002) consideran que los efectos de los óxidos de Fe y Mn en el patrón de meteorización son sustanciales. El comportamiento geoquímico de los óxidos en las muestras meteorizadas es modificado, y por lo tanto los óxidos de Fe y Mn y los contenidos de hidróxido de aluminio incrementan, mientras el Al₂O₃ disminuye y los contenidos de Fe₂O₃ y MgO son mayores.

La intensidad de los procesos de meteorización en ambientes tropicales se refleja en la formación de sesquióxidos de hierro y aluminio. Un fuerte enriquecimiento en sesquióxidos se encontró en las muestras del noroccidente y sureste del valle de Aburrá. Este proceso referido como lateritización, caracteriza las fases finales de los perfiles de meteorización desarrollados en estas áreas. Las lateritas consisten en la predominancia de minerales que contiene goetita, hematita, hidróxido de aluminio, minerales de caolinita, y cuarzo (Schellmann, 1981). Algunos nódulos redondeados y sub redondeados se encuentran en depósitos de vertiente dentro del valle, los cuales son formados por la pérdida de Fe en oxihidróxidos de hierro y caolinita, y pueden ser interpretados como el resultado de las variaciones de los niveles freáticos, reflejando el cambio de condiciones húmedas a secas (Touni et al., 2003; Johnsson et al., 1993).

Las condiciones físicas y mecánicas de los suelos pueden ser fuertemente influenciadas por la presencia de sesquióxidos reduciendo la plasticidad de los materiales (Irfan, 1996; Duzgoren et al., 2002), incrementando la cohesión y reduciendo la capacidad de los minerales arcillosos de absorber agua (Irfan, 1996).

El Índice Químico de Alteración CIA está fuertemente afectado por la presencia de sesquióxidos de hierro y aluminio (goetita, hematina, y gibsita), tal como se observa en las muestras caracterizadas por valores anómalos de LOI. Los sesquióxidos pierden su agua de hidratación cuando son secados por encima de 105 °C (Irfan, 1996), por lo tanto esta agua es reflejada en altos valores de LOI de dichas muestras. Adicionalmente muestras enriquecidas en sesquióxidos presentan valores bajos de CIA y tienen diferentes patrones de enriquecimiento en los diagramas A-CN-K-FM.

El Índice Móvil correlaciona muy bien la intensidad de la meteorización debido a que normaliza los materiales de la meteorización con el material parental, y no incluye Fe y Al. Este índice provee una buena medida para ajustar las muestras enriquecidas en sesquióxidos encontrando un valor adecuado para la intensidad de la meteorización.

La correlación de CIA, LOI, y Imob presenta resultados muy consistentes. Estos patrones revelan un quiebre alrededor de valores de CIA de 65 en ambos diagramas, CIA/Imob y CIA/LOI, observado por un incremento en los valores. Este cambio puede representar un límite marcado entre roca meteorizada y suelo residual, caracterizado por un incremento significativo en el contenido de minerales arcillosos secundarios y cambios químicos isovolumétricos relativamente considerables. Durante las etapas tempranas los cambios geoquímicos son pequeños, en tanto que la formación de minerales de arcilla secundarios se acelera en las últimas etapas.

Los resultados en el valle de Aburrá muestran que la alta pluviosidad combinada con condiciones húmedas ha favorecido la formación de profundos perfiles de meteorización de intensidad variable. La intensidad de la meteorización observada en el valle refleja que las condiciones de humedad y temperatura han dominado por un largo tiempo. Prolongados periodos de alta pluviosidad se sugieren como los responsables de la formación de gibsita, caolinita y haloisita (Irfan, 1996 ; Johnsson et al., 1993; Duzgoren et al., 2002). Adicionalmente suelos dominados por composiciones ricas en caolinita son desarrollados en superficies más viejas y empobrecidas que aquellas superficies más recientes del relieve (Johnsson et al., 1993).

Las condiciones intensas de humedad y calor pueden ser entonces las responsables de la meteorización y la movilización de grandes depósitos de vertiente sobre el valle de Aburrá durante el Cuaternario. Estos procesos, detonados por la saturación de los regolitos sugieren un ambiente húmedo, con suficiente agua para generar la meteorización e iniciar la ocurrencia de los flujos de lodos y escombros observados en el valle.

5. CONCLUSIONES

Los materiales que componen las vertientes del valle de Aburrá presentan una intensa historia de meteorización, caracterizada por el incremento del desarrollo de minerales de arcilla y sesquióxidos. Las concentraciones de CaO, Na₂O, K₂O decrecen marcadamente en los productos de meteorización comparados con las rocas frescas, en tanto las concentraciones de Al₂O₃, Fe₂O₃, y MgO incrementan significativamente. La caolinita y haloisita son las arcillas dominantes en los materiales más intensamente meteorizados.

Los patrones de meteorización de rocas graníticas, volcánicas sedimentarias, metamórficas y ofiolíticas que afloran en el valle de Aburrá presentan una tendencia lineal en el diagrama A-CN-K y siguen tendencias similares a las observadas alrededor del mundo por Nesbitt and Young (1984), y que valida la correlación establecida entre depósitos de vertiente y roca parental.

Los índices de meteorización química proveen un buen indicador del grado de meteorización de los depósitos de vertiente y rocas fuentes en el valle de Aburrá. El LOI y CIA incrementan con el grado de meteorización; sin embargo estos índices son sensibles a la presencia de sesquióxidos, comunes en nuestro ambiente. Por lo tanto deben ser utilizados con cuidado para ambientes tropicales, donde el proceso de lateritización son comunes. El Índice Móvil (Imob) resulta ser más consistente para ambientes tropicales, ya que igualmente cambia con el incremento de la intensidad de la meteorización, pero adicionalmente no presenta inconsistencia con la presencia de sesquióxidos. Se recomienda la combinación de diferentes índices de meteorización con criterios variables. La combinación de LOI, CIA, y Imob utilizada en este trabajo sugiere que la historia de meteorización en el valle de Aburrá ha sido por un largo periodo de tiempo y con gran intensidad.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue financiado por el programa de Becas del Banco Interamericano de Desarrollo para estudios en Universidades Japonesas.

REFERENCIAS

- AMVA-GSM - Área Metropolitana del Valle de Aburrá-Grupo de Sismología de Medellín, 2002. Microzonificación sísmica de los municipios del Valle de Aburrá y definición de zonas de riesgo por movimientos en masa e inundaciones. Municipio de Medellín - Sistema Municipal de Prevención y Atención de desastres. Reporte interno, Capítulo 3: Geología del Valle de Aburrá. 76 P.
- Arel, E. and Tugrul, A., 2001. Weathering and its relation to geomechanical properties of Cavusbasi granitic rocks in northwestern Turkey. *Bull. Eng. Geol. Env.* Vol. 60. pp. 123-133.
- Arias, A., 2003. La diversidad del relieve y lo suelos en el altiplano de Santa Rosa de Osos (Antioquia): sus significados ambientales. *Boletín Ciencias de la Tierra.* No. 15. pp. 51-72.
- Aristizábal, E. y Yokota, S., 2006. Geomorfología aplicada a la ocurrencia de deslizamientos en el valle de Aburrá. *Dyna.* Vol. 149. 2006. pp. 5-16.
- Duzgoren, N., Aydin, A. and Malpas, J., 2002. Distribution of clay minerals along a weathered pyroclastic profile, Hong Kong. *Catena.* Vol. 50. pp. 17-41.
- Ego, F. and Sebrier, M., 1995. Is the Cauca-Patia and Romeral fault system left- or right-lateral?. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 22. pp. 33-36.
- Fedo, C., Nesbitt, H. and Young, G., 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology.* Vol. 23. pp. 921-924.
- Gupta, A. and Rao, K., 2001. Weathering indices and their applicability for crystalline rocks. *Bull. Eng. Geol. Env.* Vol. 60. pp. 201-221.
- Irfan, T., 1999. Characterization of weathered volcanic rocks in Hong Kong. *Quart. J. Engng. Geol.* Vol. 32. pp. 317-348.
- Irfan, T.Y., 1996. Mineralogy, fabric properties and classification of weathered granites. *Hong Kong. Quart. J. Engng. Geol.* Vol. 29. pp. 5-35.
- Kimura, J. and Yamada, Y., 1996. Evaluation of major and trace element analyses using a flux to sample ratio of two to one glass beads. *J. Mineral. Petr. Econ. Geol.* Vol. 91. pp. 62-72.
- Johnsson, M., Ellen, S. and Mckittrick, M., 1993. Intensity and duration of chemical weathering: an example from soil clays of the southeastern Koolau Mountains, Oahu, Hawaii. In: Johnsson, M.J., Basu, A. (Eds), *Processes Controlling the composition of clastic sediments.* *Geol. Soc. Amer. Spec.* Vol. 284. pp. 147-170.
- Maya, M. y González, H., 1995. Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia. *Boletín Geológico Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química Ingeominas.* Vol. 35. pp. 43-57.
- McCourt, W., Aspden, J. and Brook, M., 1984. New geological and geochronological data from the Colombian Andes: continental growth by multiple accretion. *J. Geol. Soc.* Vol. 141. pp. 831-845.
- McFadden, L., 1988. Climatic influences on rates and processes of soil development in Quaternary deposits of southern California. *Geol. Soc. Amer. Spec.* Vol. 216. pp. 153-177.
- Modenesi-Gauttieri, M. and Motta, de Toledo M., 1996. Weathering and the formation of hillslope deposits in tropical highlands of Itatiaia-southeastern Brazil. *Catena.* Vol. 27. pp. 81-103.

- Moon, V. and Jayawardane, J., 2004. Geomechanical and geochemical changes during early stages of weathering of Karamu Basalt, New Zealand. *Engng. Geol.* Vol. 74. pp. 57-72.
- Nesbitt, H. and Young, G., 1989. Formation and diagenesis of weathering profiles. *J. Geol.* Vol. 97. pp. 129-147.
- Nesbitt, H. and Young, G., 1984. Prediction of some weathering patterns of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochim. Cosmochim. Acta* 48, pp. 1523-1534.
- Nesbitt, H. and Young, G., 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature.* Vol. 279. pp. 715-717.
- Nesbitt, H., Young, G., McLennan, S. and Keays, R., 1996. Effects of chemical weathering and sorting on the petrogenesis of siliciclastic sediments, with implication for provenance studies. *J. Geol.* Vol. 104. pp. 525-542.
- Ng, C., Guan, P. and Shang, Y., 2001. Weathering mechanisms and indices of the igneous rocks of Hong Kong. *Quart. J. Engng Geol.* Vol. 34. pp. 133-151.
- Ortiz, E., 2002. Evaluation of neotectonic activity of The Cauca-Romeral Fault System near western Medellín, Colombia. Graduate Thesis, Shimane University. 119 P.
- Price, J. and Velbel, M., 2003. Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks. *Chem. Geol.* Vol. 202. pp. 397-416.
- Rahardjo, H., Aung, K., Leong, E. and Rezaur, R., 2004. Characteristics of residual soils in Singapore formed by weathering. *Engng. Geol.* Vol. 73. pp. 157-169.
- Restrepo, J. y Toussaint, J., 1984. Unidades Litológicas de los alrededores de Medellín. *Mem Primera Conf Riesgo Geol. V. de A., Medellín.* 20 P.
- Roser, B.P., Sawada, Y. and Kabeto, K., 1998. Crushing performance and contamination trials of a tungsten carbide ring mill compared to agate grinding. *Geosci. Rept. Shimane Univ.* Vol. 17. pp. 1-11.
- Schellmann, W., 1981. Considerations on the definition and classification of laterites. In: Bourman, R., Ollier, C.D., A critique of the Schellmann definition and classification of laterite. *Catena.* Vol. 47. pp. 117-131.
- Tonui, E., Eggleton, T. and Taylor, G., 2003. Micromorphology and chemical weathering of K-rich trachyandesite and an associated sedimentary cover (Parkes, SE Australia). *Catena.* Vol. 739. pp. 1-27.
- Voicu, G. and Bardoux, M., 2002. Geochemical behavior under tropical weathering of the Barama-Mazaruni greenstone belt at Omai gold mine, Guiana shield. *Appl. Geochem.* Vol. 17. pp. 321-336
- Yokota, S. and Iwamatsu, A., 1999. Weathering distribution in a steep slope of soft pyroclastic rocks as an indicator of slope instability. *Engng. Geol.* Vol. 55. pp. 57-68.
- Yokota, S. and Ortiz, E., 2003. C 14 dating of an organic paleosol covering gravel beds distributed along the San Jerónimo Fault, Western Medellín, Colombia. *Geosci. Rept. Shimane Univ.* Vol. 22. pp. 179-182.