

ALTERACIÓN FÍSICA DE LOS FRAGMENTOS DE MATRIZ Y DE LOS VIDRIOS VOLCÁNICOS

por

Flórez M. M.T.¹, L.N. Parra S.² & D. Malagón³

Resumen

M.T. Flórez M., L.N. Parra S. & D. Malagón. Alteración física de los fragmentos de matriz y de los vidrios volcánicos. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **30** (115): 243-258. 2006. ISSN 0370-3908.

Los diferentes componentes de las cenizas volcánicas no tienen igual susceptibilidad a meteorizarse, ello lo evidencian los resultados obtenidos en esta investigación, donde se tomaron tres de estos componentes: fragmentos de matriz, vidrios volcánicos coloreados y vidrios volcánicos incoloros los cuales, luego de haber estado sometidos a disolución durante dos años en ácido húmico, en agua acidulada y en ácido oxálico, permiten mostrar que, de ellos, son los fragmentos de matriz los que presentan mayor superficie específica, mayor superficie de reacción, mayor número de rasgos de alteración superficial y son los que producen mayores cantidades de iones de Al^{3+} , Si^{4+} y Fe^{3+} , por ello, son los más susceptibles de ser meteorizados.

Palabras clave: Cenizas volcánicas, fragmentos de matriz, vidrio volcánico, meteorización, alteración, Departamentos de Caldas y Antioquia, Colombia.

Abstract

Different components of the volcanic ashes do not have the same susceptibility to weathering. During this investigation, matrix fragments, colored and colorless volcanic glass shards components were subjected to experimental weathering during almost two years in humic acid, acidulated water and oxalic acid. The matrix fragments were the most susceptible of being weathering because they presented at the final of the experimental cycle larger specific and reaction surfaces, more features of superficial alteration and they release greater quantities of Al^{3+} , Si^{4+} and Fe^{3+} ions.

Key words: Volcanic ashes, matrix fragments, glass shards, weathering, alteration, Departaments of Caldas and Antioquia, Colombia.

¹ Ingeniera Geóloga, MSc., Geomorfología y Suelos. Ph D., Suelos y Aguas. Docente Investigador Universidad de Antioquia, Centro de Investigaciones Ambientales, Facultad de Ingeniería. Correo electrónico: mtflorez@udea.edu.co.

² Ingeniero Geólogo, MSc., Ciencia y Técnica del Carbón, Ph D., Biología. Docente Investigador Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Escuela de Geociencias. Correo electrónico: lnparra@unalmed.edu.co

³ Ingeniero Agrónomo. Ph D. Correo electrónico: dimas3210@yahoo.es

Introducción

Estudiar en el laboratorio la meteorización física y química de los fragmentos de matriz y de los vidrios volcánicos pertenecientes a la zona Norte de la Cordillera Central colombiana es el objetivo central de esta investigación. Para ello se elaboró un “Diseño experimental completamente al azar de efectos fijos y de arreglo factorial 3²” que tiene dos factores con tres niveles cada uno, así: Materiales (vidrio volcánico coloreado (VVC), vidrio volcánico incoloro (VVI) y fragmentos de matriz (FM)) y Reactivos (ácido húmico (AH), ácido oxálico (AO) y agua acidulada (AA)). La solubilidad de los FM, de los VVC y de los VVI, se evalúa a través de la medida de dos variables maestras: pH, conductividad eléctrica (CE) y tres variables de control: aluminio (Al), silicio (Si) y hierro (Fe) que se constituyen en las variables respuestas.

Dentro de los resultados más relevantes de esta investigación se destaca el hecho de que son los FM los que presentan mayor superficie específica, mayor superficie de reacción, mayor número de rasgos de alteración superficial y son los que producen mayores cantidades de iones de Al³⁺, Si⁴⁺ y Fe³⁺, (en un 72%), son por ello, los más susceptibles de ser meteorizados; siguen a estos los VVC (en un 23%) y luego los VVI (en un 5%).

Marco teórico

Los volcanes constituyen el único medio que pone en comunicación directa la superficie de la tierra con los niveles profundos de la corteza terrestre permitiendo la observación y el estudio de los materiales líticos de origen magmático, que constituyen aproximadamente el 80% de la corteza sólida. Los materiales que arrojan los volcanes durante las erupciones pueden ser de tres clases: gases, líquidos y sólidos. Los gases son productos que emiten los volcanes, a veces con extraordinaria violencia; son mezclas complejas cuya composición varía de unos a otros, por las distintas erupciones, e incluso por los distintos períodos de una misma erupción. Cuando la temperatura es muy elevada, (500~1.200°C) los componentes principales son: HCl, SO₃, CO₂, H₂, H₂S, HF y N₂. Cuando la temperatura varía ente 100 y 500°C predominan SO₂, H₂S, CO₂, N₂ y H₂, mientras que a temperaturas por debajo de los 60°C los principales componentes son CO₂ y H₂O_(v), en este caso, algunos autores creen que se origina a partir del metamorfismo de rocas carbonatadas. Otros componentes como el NH₃, F₂, Hg, etc., son de dudoso origen primario.

Los componentes líquidos de los volcanes son el magma fundido que recibe el nombre general de lavas, son ri-

cas en gases y fluyen por el cráter y se derraman sobre las laderas del volcán formando corrientes o coladas. El flujo de las lavas depende de su composición, temperatura, viscosidad y volumen, así como de la topografía, la cual condiciona la dirección de la colada. Estos componentes líquidos son llamados piroclastos (piros: fuego; clastos: fragmentos), son fragmentos y partículas de proyección aérea que reciben el nombre genérico de tefra o tephra: este término se reserva para designar los depósitos donde los piroclastos se encuentran sueltos; cuando las tefras están soldadas, reciben el nombre de tobas. La variedad de formas y medidas es enorme si se considera que, en su fase explosiva, una erupción de tipo medio arroja miles de metros cúbicos por segundo, de estos fragmentos.

Las tefras pueden clasificarse por su tamaño y por la forma como se depositan. Por su tamaño, **Turner & Verhogen** (1978) los clasifican como: 1. Bombas; 2. Bloques; 3. Escorias; 4. Pumita o pómez; 5. Lapilli y 6. Cenizas.

Por la forma como se depositan las tefras, **Fritsch & Reiss** (1867), citados por **Araña & Ruiz** (1974), los clasifican en campo como: 1. Cinder; 2. Tobs y tobas soldadas y, 3. Ignimbritas, en éstos últimos depósitos, se destacan en los aspectos estructurales y texturales, la presencia de fragmentos de rocas y pómez, así como de vidrio (“shards”). Las pequeñas esquirlas vítreas se distinguen normalmente de la matriz envolvente por un grado de cristalización y desvitrificación diferentes y, por su menor oxidación, hecho que le confiere a los vidrios un índice de refracción y color diferentes. La mayoría de los autores interpretan estos fragmentos de vidrio como restos de las paredes o septos de burbujas de gases liberados durante la emisión.

Los fragmentos de pómez igualmente englobados dentro de la matriz de la ignimbrita suelen aparecer estirados y, a veces, su aplastamiento produce un vetado típico —piel de serpiente— o un bandeado alternante en el que las bandas correspondientes a la matriz suelen ser más anchas y claras. El aplastamiento de los fragmentos de pómez y de los shards se debe en parte a la presión de carga, pero existe un estiramiento pronunciado cuya dirección coincide con la del movimiento del material y que se debe a la fluidez del mismo. El término “ffames”, hace referencia al aplastamiento y estiramiento de estos fragmentos vítreos o de pómez, aún plásticos, durante el flujo laminar. Las texturas de flujo laminar se reflejan también en la disposición paralela de los fenocristales, cuya dimensión máxima coincide con la dirección del movimiento.

Componentes mineralógicos de las cenizas volcánicas: se diferencia tres tipos de componentes de las ceni-

zas volcánicas, los cuales distingue con base en los parámetros como el tamaño y la composición, estos son: cristales, líticos o fragmentos vítreos densos y pumitas que incluyen esquirlas de vidrio.

Spark et al., (1977), señalan que las cenizas volcánicas están compuestas de minerales, fragmentos de roca y esquirlas de vidrio. Algunos minerales se encuentran recubiertos por vidrio y su proporción con respecto al mineral es el resultado de la fragmentación magmática. Para **Fisher & Schmincke** (1984), las cenizas volcánicas están compuestas de materiales vítreos, fenocristales y partículas líticas. Los materiales vítreos consisten esencialmente en esquirlas de vidrio volcánico con o sin vesículas, incoloros (ácidos) o coloreados (básicos).

Los fenocristales consisten en minerales pirogénicos, la mayoría de ellos euhedrales y pueden o no estar recubiertos por vidrio volcánico comagmático; éstos incluyen cuarzo bipiramidal, biotita, plagioclasa y feldespato-K (sanidina), olivino, piroxenos y anfíboles. Las partículas líticas pueden ser juveniles, cognatas o accidentales. **Heiken & Wohletz** (1985), plantean que las cenizas volcánicas constan de tres componentes: fragmentos de minerales, esquirlas de vidrio (granos de pumita) y fragmentos líticos accidentales. Los fragmentos de minerales son cristales precipitados del magma original líquido antes de la erupción, la variedad de éstos provee información acerca de la composición del magma. Las esquirlas de vidrio son esquirlas solidificadas del magma cuya densidad y porcentaje de vesículas o burbujas son utilizadas para estimar indirectamente la cantidad de gas presente. Los fragmentos líticos accidentales ayudan a entender el tipo de rocas presentes en el conducto y en el sistema volcánico.

Shoji, Nanzyo & Dahlgren (1993), caracterizan y clasifican a las cenizas volcánicas con base en la composición mineralógica y química. Desde el punto de vista mineralógico, diferencian dos categorías: Minerales claros cuya gravedad específica es $<2.8-3.0$ y minerales oscuros cuya gravedad específica es $>2.8-3.0$. Los minerales claros son esencialmente vidrio volcánico incoloro \gg feldespatos y plagioclasas \gg silicatos (cuarzo, cristobalita y tridimita) $>$ mica. La distribución de plagioclasa y feldespato alcalino depende de la composición química del magma. Los minerales oscuros son esencialmente hiperstena $>$ minerales opacos $>$ augita $>$ hornblenda.

La ocurrencia de otros minerales esta relacionada con las zonas volcánicas. Señalan que las cenizas volcánicas están dominadas por vidrio volcánico que presenta una baja resistencia a la meteorización química y es un cons-

tituyente de gran importancia como material parental para los suelos ándicos. En las cenizas pueden encontrarse vidrios incoloros y coloreados y estos últimos, son más susceptibles a meteorizarse. Desde el punto de vista químico clasifican a las cenizas volcánicas dentro de alguna de los cinco tipos de rocas volcánicas, agrupadas con base en el contenido de sílice total, como: riolitas, dacitas, andesitas, andesita-basáltica y basalto. En cuanto al tamaño de partículas, indican que los minerales cristalinos son más comunes en un rango de tamaño entre 0.1-0.15 mm. La plagioclasa muestra una distribución uniforme en las fracciones arenas y limos. Los vidrios volcánicos se incrementan en una relativa proporción con respecto a la plagioclasa y a los minerales pesados a medida que el tamaño de las partículas decrece.

El **Igac** (1991), separa en las cenizas volcánicas de Colombia, tres fracciones: arena (0.053-0.25mm), limo (<0.053 mm) y arcillas ($<<0.05$ mm), las cuales varían en composición. La fracción arena esta constituida por feldespatos (40-50%), cuarzo (7%), vidrio volcánico incoloro (15%) y coloreado (2%, dependiendo de la región), anfíboles (10%), piroxenos (5-10%), micas, hematitas, goetitas, fitolitos, fragmentos líticos, fragmentos de tobas y pumitas y minerales alterados no identificables. En la fracción limo registra la presencia de cuarzo, cristobalita, anfíboles y plagioclasas como materiales primarios dominantes y en la fracción arcilla, alófana, imogolita, haloisita, caolinita y gibsitita, estas últimas en menor proporción.

En la **Key Soil Taxonomy** (Usda, 1998), se define el material parental de los Andisoles como aquel que está constituido por partículas con diámetro <2 mm y en él se incluyen cenizas, pumitas, cinders y otras eyecciones volcánicas. Dichos suelos pueden contener porcentajes de vidrio entre 5% y 30%.

Para **Flórez** (2000), las cenizas volcánicas pueden ser caracterizadas desde varios puntos de vista: 1. composición química de los componentes, 2. tamaño de los componentes y, 3. composición de los componentes.

1. *Desde la composición química de los componentes:* El contenido de SiO_2 , esencialmente, permite agrupar a las cenizas volcánicas en tres categorías: a. ácidas, cuando el contenido de SiO_2 es mayor del 62%, b. intermedias, cuando el contenido de SiO_2 varía entre 54-62% y, c. básicas, cuando el contenido de SiO_2 es menor del 54%. El primer grupo, de acuerdo con el tipo de magma, es considerado riolítico-dacítico, pertenecientes a la serie toleítica y se caracteriza por la dominancia de minerales. El segundo grupo, se forma con un magma andesítico y basaltito-andesítico, pertene-

ciente a la serie calcoalcalina y se caracteriza por la dominancia de minerales félsicos y máficos en proporciones ligeramente similares. El tercer grupo, procede de un magma basáltico, perteneciente a la serie alcalina y está constituido por minerales máficos del tipo de los ferromagnesianos, en una gran proporción.

2. *Desde el punto de vista del tamaño de los componentes:* Clasifica a las cenizas volcánicas como finas con diámetros entre 0.062-0.25mm, medias con diámetros entre 0.25-0.5 mm y gruesas con diámetros entre 0.5-2.0 mm. Relaciona estos tamaños con la cantidad y la distancia del depósito a la fuente. A medida que disminuye el tamaño de la ceniza y aumenta la distancia a la fuente, aumenta la proporción de los fenocristales, los fragmentos de matriz y los vidrios volcánicos. Los tamaños más gruesos se localizan en cercanías a la fuente volcánica y en ellos son comunes los fragmentos líticos y los fenocristales gruesos.
3. *Desde el punto de vista de sus componentes:* Reporta que las cenizas volcánicas están constituidas por: fragmentos líticos, fragmentos de matriz, vidrio volcánico y fenocristales. Los porcentajes relativos de estos componentes en cada capa de ceniza volcánica varían dependiendo de: a. composición química, b. tamaño del material y, c. distancia del depósito a la fuente. En ese sentido una descripción de estos componentes es la siguiente:

Los fenocristales (F): Comprende todos los minerales cristalinos presentes en la ceniza volcánica, su contenido es más alto en tefras andesíticas y más bajo en tefras ríolitas y basálticas. La composición de los fenocristales puede dividirse en dos categorías: minerales primarios livianos (g.e.<2.8-3.0) y minerales primarios pesados (g.e.>2.8-3.0). Los minerales primarios livianos predominan en las tefras con un rango de abundancia entre 70 y 95%. Dentro de la categoría de minerales livianos, en cuanto a abundancia, están: feldespato/plagioclasa > silicatos > mica. De las plagioclasas, la andesina ($Ab_{70}An_{30}$ - $Ab_{50}An_{50}$) y labradorita ($Ab_{50}An_{50}$ - $Ab_{30}An_{70}$) son las más comunes. Los minerales pesados son sólo una pequeña fracción de las cenizas volcánicas, con una composición química félsica e intermedia. La abundancia mineral relativa de los minerales pesados de las tefras es: hipersteno > minerales opacos > augita > hornblenda. La ocurrencia de otros minerales ferromagnesianos depende de la fuente de magma del volcán.

Los fragmentos líticos (FL): Son fragmentos de roca de tipo accesorio, que se encuentran mezclados con la ceniza volcánica, pueden ser fragmentos de rocas

hipabisales y volcánicas consolidadas, derivadas de los mismos conos eruptivos; otros fragmentos líticos pueden ser accidentales, derivados de los basamentos subvolcánicos y éstos pueden consistir en cualquier clase de roca, ya sean accesorios o accidentales; muchas eyecciones líticas exhiben los efectos del metamorfismo de contacto. Muchos de ellos pueden ser parcialmente vitrificados antes de la erupción.

Los fragmentos de matriz (FM): Representan una parte del sistema magmático que fue rápidamente enfriado, razón por la cual se producen numerosos sitios de nucleación de cristales que estuvieron limitados por el tamaño de este y produjeron numerosos microlitos y crisolitos (Figuras 1a y 1b). Los FM son el resultado de la cristalización continua bajo presión uniforme, algunos llegan a ser esencialmente vítreos y exhiben diminutas grietas incurvadas, a veces concéntricas, debidas a la contracción del vidrio durante el enfriamiento, dando lugar a una estructura perlítica. Algunos FM se caracterizan por una estructura vesicular, expresión referida a la matriz con burbujas atrapadas, las que pueden ser en forma de almendra, redondeadas, elipsoidales o, aún, tabulares, muchas veces pueden estar alineadas debido al movimiento o corriente que tiene lugar en la lava aún líquida. A nivel de forma los FM no siguen ningún patrón particular, son amorfos, algunos bordes son angulosos, ligeramente curvos o localmente aplanados; como fragmentos pueden ser láminas o sólidos gruesos de varios nm de espesor.

Los Vidrios Volcánicos: Pueden ser vidrios volcánicos coloreados o vidrios volcánicos incoloros.

Los Vidrios Volcánicos Coloreados (VVC): Son cuerpos sólidos, láminas delgadas de escaso espesor o esquirlas vítreas, con formas irregulares, bordes redondeados o angulosos y con fractura concoidea, curva o planar; con o sin grietas, canales o particiones irregulares. Las superficies son irregulares y normalmente presentan adherencias del mismo material. A veces se hacen evidentes las texturas fluidales y las inclusiones de otros minerales bien desarrollados, como zeolitas, que puede intercrecer en las vesículas de las cuales adquiere su forma redondeada. Son de color pardo y baja transparencia, en general, irregulares. Algunos presentan anisotropía, localizada en los bordes o en sitios en donde se ubican las inclusiones; generalmente no las poseen, pero cuando las tienen, éstas son de minerales opacos y, en forma menos usual, inclusiones fluidas. Ocasionalmente presentan en sus superficies adherencias de un material arcilloso pardo u oscuro que le da al vidrio un aspecto pulverulento. Muchas veces este recubrimiento es dominante y llega a invadir totalmente el grano impidiendo su identificación. Pueden ser clasificados como:

1. Pardos con superficies lisas;
2. Pardos con superficies lisas y con inclusiones magnéticas y,
3. Pardos con superficies lisas e inclusiones de minerales o fluidas, Figuras 1c y 1d.

Los Vidrios Volcánicos Incoloros (VVI): Son silicatos hidratados que tienen una estructura caracterizada por uniones tetrahedrales débiles de silicio con espacios intermoleculares (Fisher & Schmincke, 1984). Este se descompone más rápidamente que las fases minerales asociadas y es un componente importante de la tefra. Flórez & Parra (1992) los agrupan con base en su morfología, tamaño y el índice de refracción en dos grupos:

1er. Grupo: Vidrios Escoriáceos: Poseen abundantes vesículas en forma de cavidades largas finas, ovoides o esféricas, altamente elongadas y cilíndricas. Son hialinos, incoloros, ocasionalmente teñidos por óxidos de hierro, irregulares, algunos curvos y con lados cóncavos, generalmente presentan bordes angulosos, escasamente redondeados. Las vesículas que son elongadas y generalmente paralelas a la mayor longitud del vidrio, pueden presentar pseudo orientación indicando, posiblemente, líneas de flujo o estructura fluidal; algunas tienen paredes lisas y en ellas pueden verse pequeñas partículas y/o minerales; son también comunes las vesículas curvoplanares y alargadas que dan al vidrio un aspecto esquelético (Figuras 1e y 1f). Estos vidrios vesiculados se pueden subdividir en:

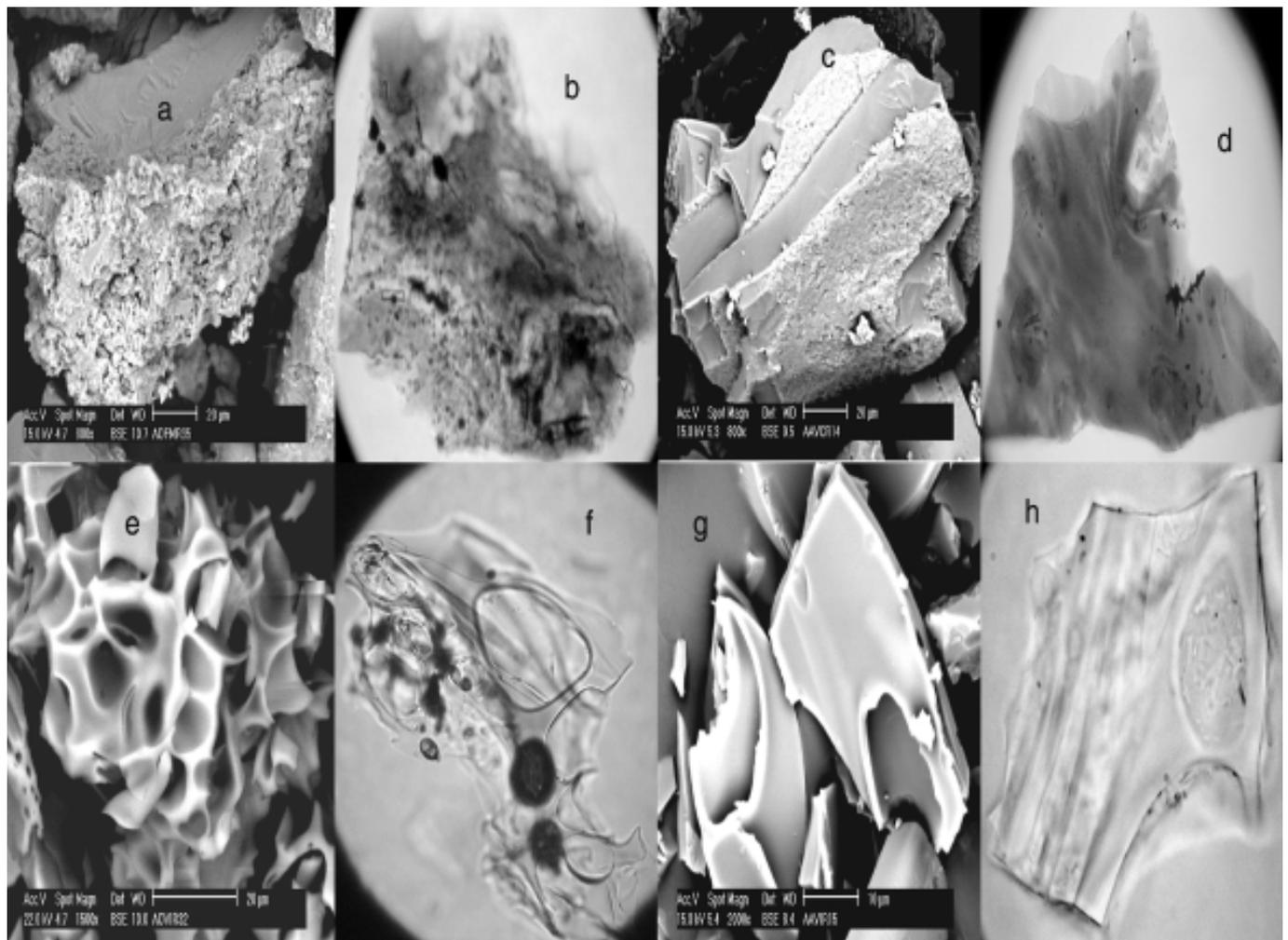


Figura 1. Materiales volcánicos: **a y b:** FM en microscopía electrónica y óptica respectivamente, **c y d:** VVC en microscopía electrónica y óptica respectivamente, **e y f:** VVI escoriáceos en microscopía electrónica y óptica respectivamente y, **g y h:** VVI no escoriáceos en microscopía electrónica y óptica respectivamente.

1. Incoloros con abundantes vesículas esféricas y ovaladas sin inclusiones;
2. Incoloros, con abundantes vesículas e inclusiones de minerales;
3. Incoloros con abundantes vesículas e inclusiones fluidas;
4. Incoloros con abundantes vesículas, inclusiones fluidas e inclusiones de minerales;
5. Incoloros de aspecto lechoso, hidratados, con abundantes vesículas redondeadas y ovaladas. Algunos vidrios tienen inclusiones de minerales y fluidas y pueden o no tener recubrimientos y/o películas de óxidos e hidróxidos de Fe y Mn.

2do. Grupo: Vidrios No Escoriáceos: Son vidrios hialinos e incoloros en forma de placas planas, con bordes subangulares a redondeados, ocasionalmente angulosos y con superficies lisas; cuando se separan por magnetismo en isodinámico, se retienen en la fracción magnética; cuando la separación se lleva a cabo por densidad utilizando bromoformo, integran la fracción pesada. Ocasionalmente tienen recubrimientos o adherencias de un material pardo rojizo o negro, posiblemente películas de óxidos y/o hidróxidos de Fe y Mn, igualmente, inclusiones de minerales y fluidas (Figuras 1g y 1h). Pueden ser: 1. Incoloros con superficies lisas y con inclusiones de minerales y, 2. Incoloros con superficies lisas e inclusiones férricas y/o magnéticas.

El tipo y composición de la ceniza volcánica que se encuentra en Colombia ha sido estudiada por varios investigadores, entre ellos, se destacan los trabajos de **Silva** (1953), quien señala la presencia de vidrio volcánico; los de **Luna** (1963), que estudia la mineralogía de algunos Andosoles del departamento de Antioquia y los correlaciona con muestras del Japón, Nueva Zelandia y Chile, concluyendo que la ceniza volcánica es de tipo dacítico-andesítico, con abundante vidrio; los estudios de **Hermelin** (1980), hacen énfasis en la mineralogía, la cual está dominada por vidrio incoloro, ferromagnesianos, biotita, cuarzo y feldespato.

Estado del arte

Investigadores como **Walker** (1971); **Besoain**, 1972; **Wada**, 1977; **Spark et al.**, (1977); **Fisher & Schmincke** (1984); **Heiken & Wohletz** (1985); **Igac** (1991); **Shoji et al.**, (1993) y **Shoji, Nanzyo & Dahlgren** (1993), entre otros, coinciden en que las cenizas volcánicas están constituidas por vidrios volcánicos (VV), fragmentos líticos

(FL) y fenocristales (F), ninguno de estos autores define explícitamente los fragmentos de matriz (FM) como parte de estos componentes; sin embargo, **Flórez & Parra** (1991), **Flórez** (2000) y (2004), los describen y los nombran como tales y asimilándolos a lo que **Fisher & Schmincke** (1984) llaman líticos cognatos o a lo que en otros estudios mineralógicos en Andisoles, llaman “agregados” de óxidos e hidróxidos de Fe y Al.

Estos autores señalan que en los Andisoles estudiados en la parte norte de la Cordillera Central de Colombia, los vidrios volcánicos no presentan rasgos o marcas de meteorización o alteración que permitan evidenciar sean los precursores de los mbgc, por lo menos, no en el grado que otros investigadores lo han resaltado. Indican que en cenizas frescas o en suelos derivados de ceniza volcánica muy jóvenes, los FM se reconocen por su aspecto “lechoso”, “isotrópico” y por la presencia de microlitos y cristalitos englobados en una matriz vítrea y que cuando estos son sometidos a una fuerte limpieza con ácido fluorhídrico se liberan de los recubrimientos y aparecen las formas lechosas e isotropitas; concluyen que el recubrimiento por óxidos de Fe y/o Mn impide su clasificación mineralógica. Los FM una vez caen al suelo empiezan su proceso de alteración que continúa hasta fases muy lejanas de la pedogénesis; sin embargo, llega un momento en el cual la producción de iones (principalmente de Al, Si y Fe) llega a ser más alta que la que el mismo sistema suelo puede asimilar; entonces estos iones se acumulan en las superficies de los FM hasta invadir el suelo e inactivan en el proceso de alteración.

En la mayoría de las investigaciones y estudios realizados sobre cenizas volcánicas solo se registran como componentes de éstas, los minerales, el vidrio y los fragmentos líticos; en cuanto a éstos últimos, sólo **Fisher & Schmincke** (1984), establecen diferencias importantes que luego **Flórez & Parra** (1992) precisan en cuanto a la existencia de FM y FL propiamente dichos. El VV es precursor de los materiales de bajo grado de cristalinidad (mbgc) (**Shoji et al.**, 1993). En esta investigación se plantea que ni es el único, ni es el precursor principal. En tal sentido tiene importancia investigar cual es la reactividad de estos materiales (FM y VV) y dar luces sobre cuál es el que más se disuelve y en forma más rápida y, por lo tanto participa más activamente en la formación de mbgc, sobre los cuales se fundamenta en gran parte la andolización.

Materiales y métodos

Los VVI se extrajeron de una pumita que hace parte de un depósito piroclástico localizado en las laderas del vol-

cán Cerro Bravo, cerca de la ciudad de Manizales en el departamento de Caldas. Los VVC se extrajeron de una ignimbrita que hace parte de la Formación Combia, localizada la margen derecha de la carretera que de Bolombolo conduce a Ciudad Bolívar en el suroeste del Departamento de Antioquia y los FM se extrajeron tanto de la pumita como de la ignimbrita. Los VVC obtenidos de la ignimbrita, representan una fusión de piroclastos, lo que significa que es lo que se obtendría si se cogiesen todos los componentes de un piroclasto y se fundieran (fiame: fusión de un volumen de piroclastos que luego se enfrían rápidamente). Los VVI obtenidos de la pumita representan una escoria de una lava, y los fragmentos de matriz son como la parte recrystalizada de un magma. La razón por la cual se extrajeron los FM y los VV de estas rocas y no de los suelos se debe a que se pensó realizar el experimento con materiales que no hubiesen estado sometidos a procesos de alteración y/o pedogénesis previos.

Tales procesos dejan marcas de alteración que pueden ocasionar confusión sobre el efecto de los reactivos (AH, AA y AO) en estos minerales y dificultan evaluar correctamente el proceso de disolución ocurrido en ellos. Con los materiales frescos es posible identificar física y químicamente la acción de las soluciones sobre ellos.

La meteorización de los FM, de los VVC y de los VVI, se evalúa a través de la disolución de estos tres materiales individualmente en cada uno de los reactivos propuestos. Para ello se realizó un experimento de disolución o meteorización experimental que requirió de un diseño estadístico completamente aleatorio de efectos fijos y de arreglo factorial 3^2 .

Previamente se realizó un experimento prueba de disolución con reemplazos, con los tres materiales (FM, VVI y VVC) y con tres reactivos [ácido húmico (AH), agua acidulada (AA) y ácido oxálico (AO)] durante 30 días, con el objetivo de observar el comportamiento del pH y de la conductividad eléctrica (CE), medidos diariamente, y observar cambios que permitieran definir estados de equilibrio, precipitación o disolución de éstos materiales en tales reactivos. Con los datos obtenidos de pH y CE, se realizaron dos gráficas: pH vs Tiempo y CE vs Tiempo; en estas gráficas se encontraron dos cambios importantes en la pendiente de las curvas, los cuales coincidían entre sí para los tres minerales. Estos cambios permitieron definir tres zonas con comportamientos diferentes, la primera, con una pendiente del 50% definida con los datos tomados entre los días 1 y 11; la segunda, con una pendiente del 30%, definida con los datos tomados entre los días 12 y 21 y la tercera, con una pendiente del 12%, definida con los datos tomados entre los días 22 y 30.

Con base en la pendiente observada en cada zona en el experimento prueba, se definieron tres ciclos en la periodicidad de muestreo. Para la zona de mayor pendiente (la primera) se adjudicó el mayor número de muestreos, en este caso cada cinco días; para la segunda zona, un muestreo menor, cada 10 días y, para la menos pendiente el menor número de muestreos, cada 15 días. El muestreo se realizó durante casi 2 años, definidos así: En el primer ciclo (225 días) se muestreó cada 5 días obteniéndose 45 muestreos; en el segundo ciclo (220 días) se muestreó cada 10 días y se obtuvo 22 muestras; en el tercer ciclo (180 días), se muestreó cada 15 días y se obtuvieron 12 muestras.

La idea de utilizar diferentes días de muestreo (5, 10 y 15) obedece al deseo de determinar el efecto de disolución en el tiempo para asegurar que el sistema siempre este en desequilibrio y a que, como se están utilizando soluciones no amortiguadas de pH, se busca que el reactivo límite no sean los protones. De esta forma se asegura que existan suficiente acidez y agentes complejantes para que la reacción de disolución siempre ocurra.

Para la obtención de los FM, de los VVI y de los VVC, se tomaron 100 kilos de pumita y 100 kilos de ignimbrita. Los 100 kilos de las rocas pumítica e ignimbítica fueron sometidas a un baño de limpieza con agua y un detergente líquido a fin de eliminar óxidos superficiales, suciedad y materiales extraños adheridos; después lavado con agua para eliminar los residuos de detergente. Se trituraron hasta obtener una fracción del tamaño de arena gruesa, luego, por selección granulométrica se obtuvieron 350 g de la fracción entre 0.106 y 0.05 mm (arena fina), fracción similar al tamaño promedio de las cenizas volcánicas (Fisher & Schmincke, 1984) encontrada en los suelos.

Los 350 g de material molido de cada una de las rocas se llevó al Isodinámico (separador magnético) donde se obtuvieron dos fracciones: 1) una "pesada" que se descartó por contener en mayor proporción, ferromagnesianos, zircones y magnetitas que no eran de interés para esta investigación y, 2) una fracción "liviana" que contenía los VVI, los VVC, los FM, cuarzos y feldespatos de manera dominante, esta fracción fue de 250 g, aproximadamente. Para separar los FM y los VV de la fracción liviana en cada una de las rocas se empleó el método densimétrico a través de un embudo de separación utilizando bromoetano ($G=2.46$) y bromoformo ($G=2.44$). Después de estos tratamientos se obtuvieron 120 g de VVI, 115 g de VVC y 125 g de FM. La pureza de estos materiales se evaluó por recuento de granos en un microscopio óptico. Los FM y los VVC presentaron una conta-

minación con ferromagnesianos, cuarzo, feldespatos, zeolitas en un 10% y, los VVI con cuarzo y feldespato en un 5%.

Para la disolución de los FM y de los VV se prepararon los tres reactivos AA a una concentración 0.03 mN y su respectivo blanco a una concentración 0.003 mM. AO a una concentración de 0.33 mM y llevada con HCl a un pH de 5.0, para evaluar el efecto de un quelato bidentado. El blanco es agua. El AH, se preparó a una concentración de 30 ppm; a esta solución se le agregaron dos gotas de formaldehído al 37% para evitar la formación de hongos. El blanco de este reactivo se preparó de igual forma excepto que no se le agregaron 0.15 g de AH.

El efecto de la disolución de los FM, los VVC y los VVI, se evaluó midiendo el grado de alteración física y química que presentaban estos materiales una vez culminado cada ciclo; en este caso solo se describe la alteración física para lo cual se utilizan poblaciones de partículas y no una partícula individual. Dado su tamaño (<0.106 mm de diámetro), resulta imposible medir una misma partícula y seguir su estado de alteración por los tratamientos. El estudio de la alteración física de los FM y los VVI y los VVC, se inicia con la caracterización física que se realiza a través del siguiente procedimiento:

1. En cada material se observa la forma, los bordes, las superficies, las adherencias, la fractura, la cristalinidad, el relieve, el color, para lo cual se utilizan la microscopía óptica y la electrónica de barrido;
2. Posteriormente, se realiza el análisis de los efectos de la alteración física en cada uno de los materiales considerados;
3. Se determina el área superficial específica, mediante la interpretación de la isoterma de adsorción de N₂ (interpretación de la isoterma mediante el método BET Branauer-Emmett-Teller; **Branauer et al.**, 1938) que permite medir el efecto que tienen los tratamientos sobre la superficie de los materiales.

El estudio de la alteración física de los FM, los VVI y los VVC, parte de tres supuestos:

1. Los materiales (FM, VVC y VVI) antes de ser sometidos a la disolución, en todas sus propiedades físicas, tienen, en promedio, características homogéneas en cuanto a: forma, cristalinidad, composición química y tamaño (entre 0.106 y 0.05 mm de diámetro). En estos parámetros la desviación estándar de las poblaciones es muy pequeña y la media es muy cercana al de la malla seleccionada (-140+200);

2. La variación de las propiedades físicas es indicativa del grado de evolución de la alteración física. Se espera que la homogeneidad en las características, va a ser transformada por el efecto del AH, el AO y el AA. Posteriormente se mide que tanto varían en los FM, los VVC y los VVI estos parámetros;
3. las transformaciones físicas y químicas de los FM, los VVC y los VVI, ocurridas se observan como cambios físicos en la forma, reducción de tamaño, incremento del área superficial específica, grado de cristalinidad, transformación de superficies y bordes.

Resultados y discusión

A continuación se evalúan los cambios físicos cualitativos y cuantitativos ocurridos en los tres ciclos de disolución en los FM, los VVC y los VVI, y se comparan con el estado inicial de referencia, para establecer su grado de alteración. Las Figuras 2, 3 y 4, muestran el efecto de la disolución en los tres materiales.

Durante el primer ciclo de disolución, los FM, los VVC y los VVI, presentan rasgos de alteración física, la cual, se evidencia por la disminución de las adherencias superficiales, el aumento de la corrosión superficial, la formación de numerosas grietas de escasa longitud, el ensanchamiento y la profundización de otras preexistentes. El agrietamiento produce en algunos granos un aspecto de “resquebrajado” y con el progreso de la alteración se presenta el “fracturamiento” del grano; a medida que aumenta la disolución de los materiales se produce una desintegración fuerte del grano. Muchos rasgos se acentúan, los bordes se redondean, se corroen o aplanan, Figuras 2, 3 y 4.

En el segundo ciclo de disolución se observa un incremento de la alteración; muchos rasgos se acentúan fuertemente en algunos granos. Se evidencia un aumento en la corrosión superficial y se produce descamación o alteración esferoidal, hay un aumento de cristales negativos, oquedades y aparecen inclusiones. Los bordes de los granos se ven altamente corroídos, aplanados o extremadamente angulosos y ahusados en sus extremos, figuras 2, 3 y 4.

En el tercer ciclo se observa un mayor incremento en la alteración de los materiales; muchos rasgos se multiplican y se acentúan fuertemente. Se hace evidente un aumento en la corrosión superficial y se aumentan las estrías. El descascaramiento es más fuerte; las grietas se alargan, se profundizan y se ensanchan; aumentan los cristales negativos y en las oquedades. Las superficies se vuelven roñosas o verrucosas, igualmente se destapan inclusiones

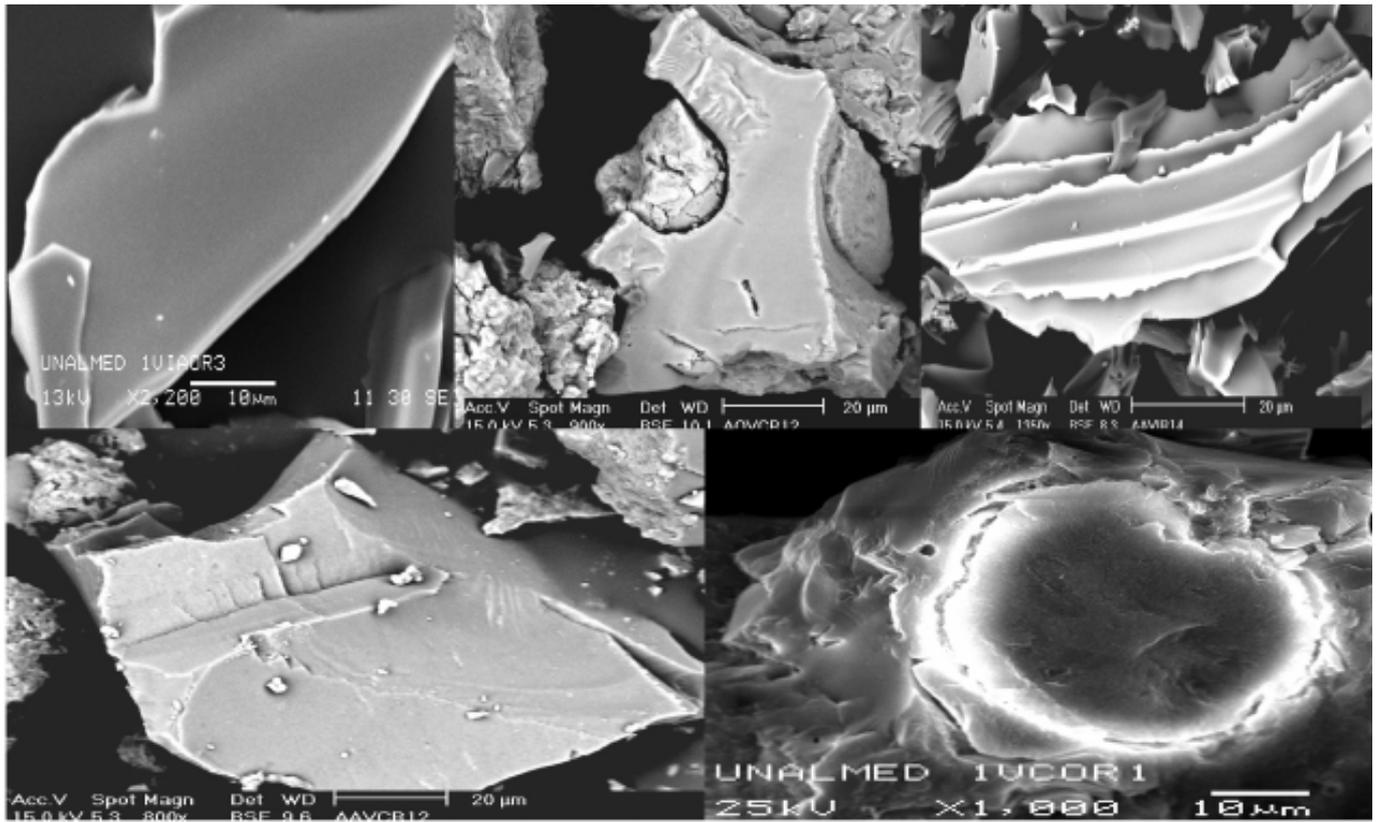


Figura 2. Características de los bordes después de la disolución por efectos del AH, el AA y el AO.
a: bordes lisos; **b:** bordes redondeados; **c:** bordes dentados; **d:** bordes angulosos; **e:** anillos de hidratación.

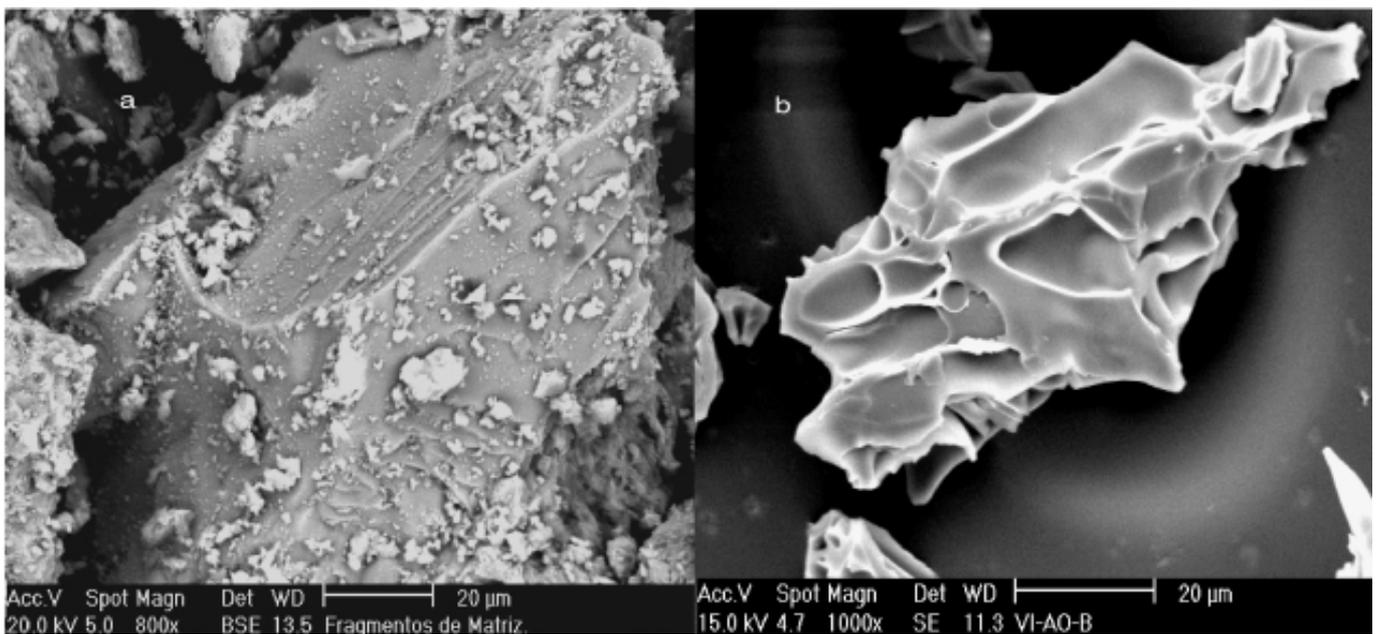


Figura 3. Características de la fractura después de la disolución por efectos del AH, el AA y el AO.
a: concoidea; **b:** irregular.

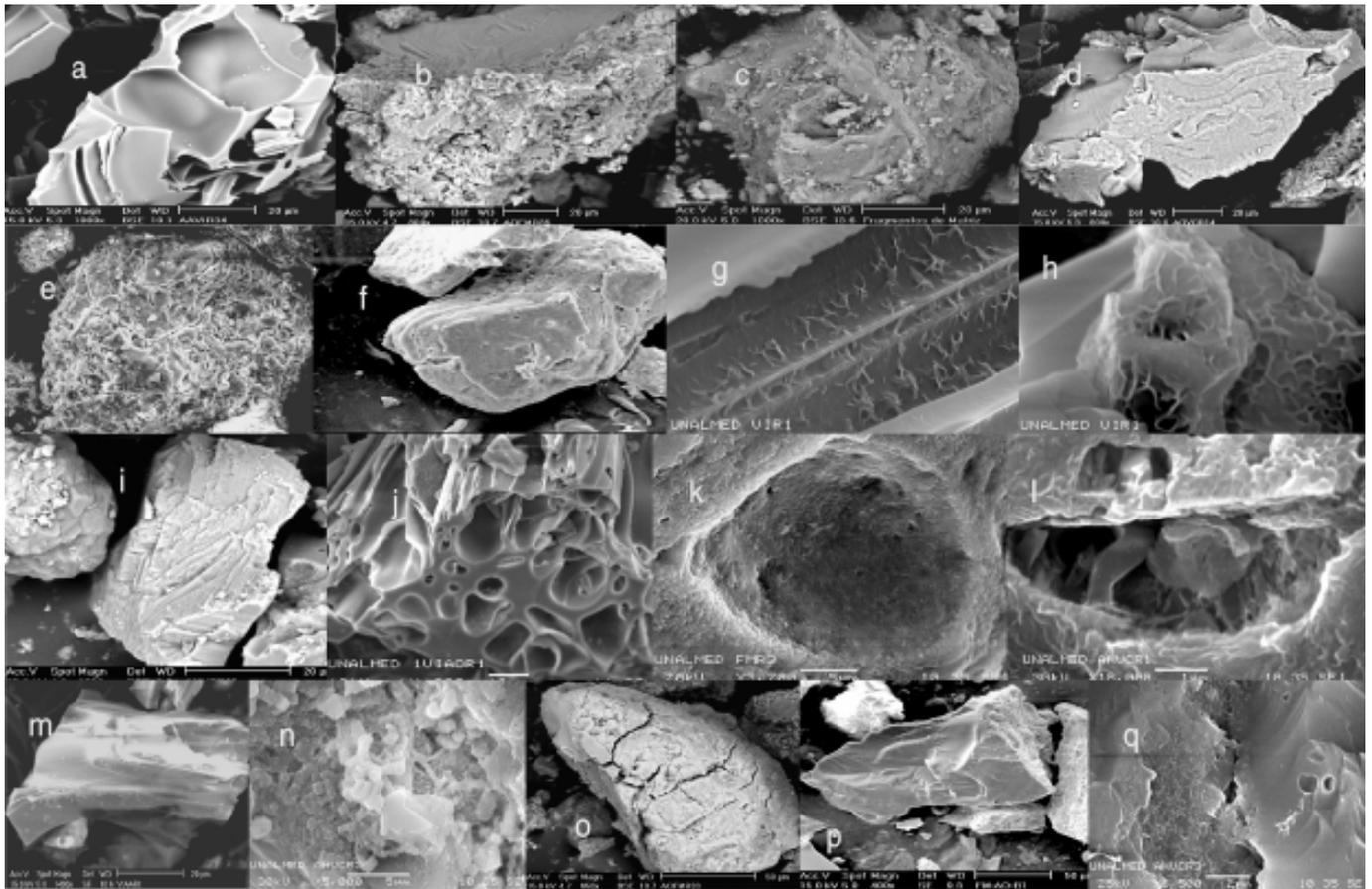


Figura 4. Características de las superficies después de la disolución por efectos del AH, el AA y el AO.

a: lisas; **b:** corroídas; **c:** pulverulentas; **d:** acanaladas; **e:** escamosas; **f:** descamadas; **g:** especuladas; **h:** alveoladas; **i:** reticuladas; **j:** foveoladas; **k:** crateriformes; **l:** surcadas; **m:** punteadas; **n:** verrucosas y/o granuladas; **o:** ruminadas; **p:** estriadas; **q:** fenestradas.

de minerales, principalmente en los FM como resultado de la intensa disolución. Los bordes de los granos son altamente alterados, algunos se aplanan o se vuelven extremadamente angulosos y muestran con terminaciones ahusadas, Figuras 2, 3 y 4.

Los FM, presentan un aspecto lechoso y opaco. El color descrito inicialmente no cambia. Los bordes se vuelven más irregulares y en algunos granos se redondean. Las formas siguen siendo irregulares o ligeramente tabulares; muy pocos FM aparecen como placas o láminas. En la mayoría de los granos las superficies se vuelven altamente irregulares, las grietas se ensanchan y profundizan y aumentan en sentido longitudinal simulando un aspecto de “resquebrajamiento”; muchas de las adherencias desaparecen, lo que hace posible la diferenciación de algunas superficies lisas, que contrastan con una cara completamente corroída, en donde, además, es notoria la formación de canales sinuosos y pequeñas escamas que dan la apariencia de “descama-

ción”. La disolución permite ver algunas caras de minerales embebidas dentro del fragmento pero sin ser diferenciables. La fractura sigue siendo concoidea y en algunos granos, irregular. Las inclusiones de minerales se encuentran alteradas y sus cavidades presentan bordes abiertos y corroídos. El grado de alteración es Alto.

Los VVC, conservan su aspecto vítreo con el tratamiento, algunos son lechosos. En algunos granos no se observa cambios de color; en otros, este es evidente y se manifiesta como una tenue coloración amarillenta, muy incoloro hacia los bordes. Los bordes son, por lo general, irregulares; redondeados o angulosos. La mayoría de los granos tienen formas irregulares y son menos frecuentes las formas laminares, pocas veces se encuentran como sólidos tabulares. Las superficies son irregulares y contrastan en muchos granos con superficies lisas, algunas de ellas muy corroídas. Son evidentes las grietas de esca-

sa longitud y profundidad y las acanaladuras sinuosas que se dejan observar debido a que muchas de las adherencias iniciales se han perdido, aunque, algunos granos aún presentan adherencias de aspecto terroso y de color negro. La fractura es concoidea e irregular. Las inclusiones de zeolitas se han transformado a otros materiales de aspecto terrosos e internamente agrietados, o han desaparecido completamente y en este caso la cavidad ha intercrecido numerosas partículas ligeramente redondeadas, como ampollas, o verrugas, de aspecto “botroidal” o como “huevos de pez”. Las superficies son irregulares y con un avanzado estado de corrosión, el descamación es frecuente, lo mismo que la escamosidad y el agrietamiento, que en algunos casos, llega a producir la fragmentación del grano; en las superficies también se observan canales sinuosos muy profundos. Las adherencias prácticamente no existen o son escasas. Se observan anillos de hidratación en los bordes de antiguas vesículas que sirvieron de cavidad a las zeolitas. El grado de alteración es Medio-Alto.

Los VVI conservan su aspecto esquelético y cavernoso; son vítreos e incoloros. Los bordes son lisos, redondeados o curvoplanares; en algunos ya se observan bordes dentados o aserrados en forma de “dientes de tiburón”. Las formas siguen siendo irregulares, como láminas planas o como tubos unidos formando tabiques. Las superficies son lisas y suaves, pero en algunos granos ya se visualizan rasgos de alteración como corrosión y formación de pequeñas partículas, ligeramente redondeadas en forma de ampollas o “huevos de pez”, localizadas en las partes más internas de los canales o tabique o en las paredes; en ellas se observan pocas adherencias, muchos se encuentran fracturados y su fractura es concoidea. El grado de alteración es Bajo.

Algunos rasgos específicos que se muestran en las superficies de los FM, de los VVC y de los VVI, como consecuencia de la alteración física producida por la disolución con AA, AO y AH, ocurrida durante 625 días, se describen y se denominan con base en terminología ampliamente utilizada en otras ciencias; la mayoría de ellos ya han sido registrados por otros investigadores en minerales como feldespatos, piroxenos y anfíboles, bajo nombres similares a los que se emplean aquí y como resultado de los diversos agentes de alteración ya sea en su ambiente natural o por el efecto de una disolución experimental.

Características de los bordes:

Lisos: Muchos VVI conservan bordes lisos sin evidencia de ser alterados por el proceso de disolución; éstos se

observan tanto en las poblaciones de granos antes de ser sometidos a la disolución como en poblaciones sujetas a la disolución. En los VVC y en los FM; solo es posible encontrarlos en el 1er. Ciclo, a medida que transcurre la disolución se vuelven irregulares, Figura 2a.

Redondeados: Algunos bordes se redondean y se vuelven curvos tanto en su sentido más longitudinal como en el sentido volumétrico. Son muy frecuentes en los VVI y en los VVC, en los cuales, se visualizan bien cuando las vesículas antes ocupadas por zeolitas, exhiben su forma, una vez que ésta se ha disuelto completamente. Estos bordes redondeados también se manifiestan por el proceso de disolución que pule superficies, Figura 2b.

Dentados o Aserrados: Son bordes en forma de “dientes de tiburón”, pequeños y con terminaciones ahusadas, muy comunes en los VVI. Se evidencian mejor a medida que avanza la alteración, después del 3er. ciclo de disolución, Figura 2c.

Angulosos: Son bordes con terminaciones muy pronunciadas y bastante irregulares, frecuentes en los tres materiales, en los cuales se comienzan a observar desde el inicio de la disolución, Figura 2d.

Anillos de hidratación: Frecuentes en los VVC, en los cuales se localizan alrededor de vesículas pero también se observan en los bordes de los VVI y esta es una evidencia del estado de hidratación después del 3er. ciclo de disolución, Figura 2e.

Características de la fractura:

Concoidea: Muy bien desarrollada en los VVI y en los FM, Figura 3a.

Irregular: Muy bien desarrollada en los tres materiales, Figura 3b.

Características de las superficies:

Lisas: Sin huellas de disolución, Figura 4a.

Corroídas: Superficies totalmente alteradas por el proceso de disolución, muy común en los FM y en los VVC, menos frecuente en los VVI en ellos solo se presenta después del 3er. ciclo de disolución, Figura 4b.

Pulverulentas: Con una cubierta de polvo diminuta. Es muy común en los tres materiales, principalmente en el estado previo a la disolución, Figura 4c.

Acanaladas: Con surcos longitudinales. Muy comunes y frecuentes en los FM y en los VVC, ellas se acentúan

y profundizan a medida que avanza la alteración de estos, Figura 4d.

Escamosas: Con estructura en forma de escamas, se ven como pequeñas escamas ligeramente redondeadas y dispuestas cerca unas de las otras; son muy frecuentes en los FM y en VVC, se visualizan bien después del 1er. ciclo de disolución y alcanzan su mayor desarrollo después del 3er. ciclo. No se observaron en los VVI, Figura 4e.

Descamadas: Muy similares a las escamosas pero en este caso el grano alterado se va descascarando en forma de una “cebolla de huevo”, es muy frecuente en los FM y en los VVC. Es muy evidente a partir del 2do. ciclo de disolución. No se observó en los VVI, Figura 4f.

Especuladas: Con cristales o apéndices espiciformes muy pequeños y superficiales. Es posible que esta textura superficial corresponda a un intercrecimiento de un mineral de neoformación, el cual fue imposible identificar por microscopía electrónica. Se observó solo en los VVI, Figura 4g.

Alveoladas: Con depresiones en forma de panal o a un “nido de abejas”. Es posible que esta textura superficial corresponda a un intercrecimiento de un mineral de neoformación, el cual fue imposible identificar por microscopía electrónica. Se observó solo en los VVI, Figura 4h.

Reticuladas: Semejante a una redcilla de escaso relieve, muy frecuente en las superficies de los FM y común en la de los VVC y observable a partir del segundo ciclo de disolución, esta superficie reticulada es más evidente a medida que avanza el proceso de disolución y es muy marcada después de los 625 días. No se observó en los VVI, Figura 4i.

Foveoladas: Con marcas en forma de pequeños hoyuelos circulares o elongados. Formada por el tipo de magma y el cambio brusco de temperatura al ser eyectado. Con la disolución estos foveolos aumentan su tamaño, sus paredes se adelgazan y ocasionalmente se rompen quedando intercomunicados varios foveolos, son muy comunes en los VVI, Figura 4j.

Crateriforme: Se manifiesta a través de huecos abiertos, profundos o superficiales, subredondeados, con bordes corroídos o lisos, bastante frecuentes en los VVC, en los cuales quedan como consecuencia de la disolución de las inclusiones de zeolitas. Estas superficies se observan después del 2do. ciclo de disolución, Figura 4k.

Surcadas: Con depresiones largas y acanalada. Es muy común en los FM y en los VVC. En los FM esta estructura fue observada después del 1er. Ciclo de disolución y en ella se pudieron diferenciar algunos cristales aciculares, posiblemente de rutilo. En los VVC esta estructura se observó después del 3er. Ciclo, Figura 4l.

Punteadas: Numerosos puntos o depresiones muy pequeñas. Frecuente en los FM y en los VVC, menos común en los VVI, en los cuales solo fue observada después del 3er. ciclo de disolución, Figura 4m.

Verrucosas - Botroidales o Ampolladas: En forma de huevos de pez o de estructura parecida a ampollas. Es una estructura muy común en los VVC y en los FM. Se forma por el intercrecimiento de numerosas partículas redondeadas que se localizan muy próximas unas de otras dando la apariencia de verrugas. Aparecen después del 2do. ciclo de disolución, Figura 4n.

Granuladas: Con pequeños granos redondeados o subredondeados o ligeramente rectangulares. Muy frecuente en los VVC y los FM, menos común en los VVI, después del 3er. ciclo de disolución, Figura 4n.

Ruminadas: Son profundas grietas que se inician en la superficie y van profundizando hasta ocasionar la fragmentación de este. Es muy común en los FM y en los VVC, estas grietas van creciendo a medida que avanza el proceso de disolución, después del 3er. ciclo, en el grano producen la desintegración de este. No se observan en los VVI, Figura 4o.

Estriadas: Con rayas longitudinales. Es muy común en los tres materiales y acompaña siempre la fractura concoidea. Se hace muy evidente con el proceso de disolución, Figura 4p.

Fenestradas: Con marcas en forma de pequeños hoyuelos o aréolas. Muy común en los FM, frecuentes en los VVC y escasos en los VVI, en los cuales, su cantidad produce la estructura punteadas descritas antes y solo se presenta después del 3er. Ciclo, Figura 4q.

Área Superficial Específica - Área BET

El Área Superficial Específica o Área BET, medida en los FM, en los VVC y en los VVI, permite evaluar cuantitativamente el grado de alteración ocurrido en estos materiales por el efecto de disolución en AH, AA o AO, si esta se incrementa, implica que ha aumentado la superficie de reacción del material.

Para realizar esta evaluación se midió inicialmente, el área superficial a estos materiales antes de someterlos a los

diversos tratamientos. En la Tabla 1, se presentan los resultados del área BET medida a los tres materiales antes y durante los tres ciclos de disolución y en la Figura 5, la representación esquemática del comportamiento de estos materiales en los tres ciclos y bajo el efecto de los tres reactivos.

Los FM presentaron la mayor superficie específica ($22,6225 \pm 0,3622 \text{ m}^2/\text{g}$), seguidos por los VVC ($14,1725 \pm 0,2693 \text{ m}^2/\text{g}$) y éstos, por los VVI ($1,6741 \pm 0,3261 \text{ m}^2/\text{g}$). El análisis se efectúa para cada material y dentro de éste, se comparan los tres resultados obtenidos en los tres ciclos en cada reactivo, valores seguidos por una letra igual no representan diferencias significativas en un intervalo de confianza del 95% y valores seguidos por una letra diferente representan diferencias significativas a un intervalo de confianza del 95%.

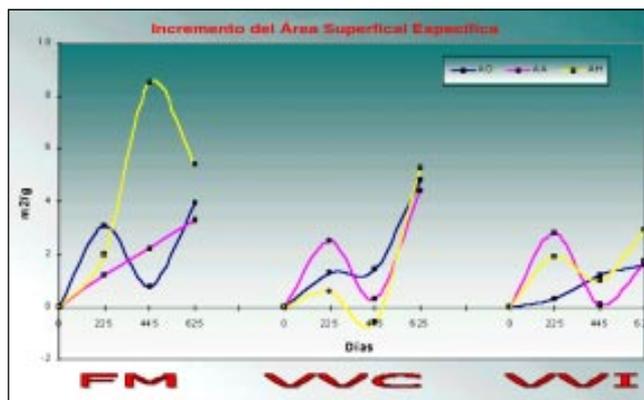


Figura 5. Comportamiento del área superficial específica en los FM, los VVC y los VVI por el efecto de la disolución en AH, AA y AO durante los tres ciclos.

Tabla 1. Relación de áreas superficiales específicas medidas después del primer, segundo y tercer ciclo de disolución en los VV y los FM.

Área BET Inicial m^2/g	Ciclos	Área Superficial Específica Bajo el Efecto de los Reactivos		
		Ácido Oxálico	Agua Acidulada	Ácidos Húmicos
VVI $1,6741 \pm 0,3261$	1er.	$1,9624 \pm 0,4109 \text{c}^*$	$4,5273 \pm 0,5272^a$	$3,5511 \pm 0,8289 \text{c}$
	2do.	$2,9223 \pm 0,4109 \text{b}$	$1,7757 \pm 0,315 \text{c}$	$2,6960 \pm 0,5475 \text{b}$
	3er.	$3,2388 \pm 0,0 \text{a}$	$3,4059 \pm 0,048 \text{b}$	$4,6240 \pm 0,0656 \text{a}$
VVC $14,1725 \pm 0,2693$	1er.	$15,4673 \pm 0,4158 \text{c}$	$16,6594 \pm 0,5356 \text{b}$	$14,8122 \pm 0,3279 \text{b}$
	2do.	$15,5524 \pm 0,2236 \text{b}$	$14,4794 \pm 0,2873 \text{c}$	$13,5767 \pm 0,3568 \text{c}$
	3er.	$18,9800 \pm 0,1614^a$	$18,600 \pm 0,2279 \text{a}$	$19,4420 \pm 0,0181^a$
FM $22,6225 \pm 0,3622$	1er.	$25,6890 \pm 0,3503 \text{b}$	$23,8141 \pm 0,3107 \text{c}$	$24,6034 \pm 0,6091 \text{c}$
	2do.	$23,4325 \pm 0,3498 \text{c}$	$24,7493 \pm 0,3250 \text{b}$	$31,0658 \pm 0,3776 \text{a}$
	3er.	$26,5200 \pm 0,2324^a$	$25,849 \pm 0,1794 \text{a}$	$28,0100 \pm 0,0226 \text{b}$
Área superficial específica sin el efecto de los reactivos				
VVI $1,6741 \pm 0,3261$	1er.	$1,6858 \pm 0,1644 \text{b}$	$3,1006 \pm 0,5071^a$	$3,6857 \pm 0,7439 \text{b}$
	2do.	$1,5990 \pm 0,3957 \text{c}$	$2,9321 \pm 0,7057 \text{b}$	$3,4174 \pm 0,6029 \text{c}$
	3er.	$3,2288 \pm 0,0847 \text{a}$	$3,1063 \pm 0,026 \text{a}$	$3,9200 \pm 0,0057 \text{a}$
VVC $14,1725 \pm 0,2693$	1er.	$17,1164 \pm 0,2529 \text{b}$	$16,6772 \pm 0,3670 \text{b}$	$14,4523 \pm 0,3331 \text{b}$
	2do.	$14,6639 \pm 0,3834 \text{c}$	$14,8353 \pm 0,2529 \text{c}$	$14,4783 \pm 0,2850 \text{b}$
	3er.	$18,8130 \pm 0,1938^a$	$17,0300 \pm 0,2041 \text{a}$	$18,5520 \pm 0,1502^a$
FM $22,6225 \pm 0,3622$	1er.	$26,8045 \pm 0,4001^a$	$23,1152 \pm 0,7545 \text{b}$	$25,4888 \pm 0,4252 \text{c}$
	2do.	$25,6345 \pm 0,4897 \text{c}$	$22,4347 \pm 0,2834 \text{c}$	$26,4764 \pm 0,3250 \text{b}$
	3er.	$26,1700 \pm 0,3552 \text{b}$	$23,8000 \pm 0,2867^a$	$28,8800 \pm 0,2888^a$

* El análisis se efectúa para cada material y dentro de éste, se comparan los tres resultados obtenidos en los tres ciclos en cada reactivo, valores seguidos por una letra igual no representan diferencias significativas a un intervalo de confianza del 95% y valores seguidos por una letra diferente representan diferencias significativas a un intervalo de confianza del 95%.

Primer ciclo: La superficie específica medida a los FM, a los VVC y a los VVI, antes de iniciar la disolución es mucho más baja que la registrada después del primer ciclo por el efecto de la disolución con AH, AO y AA y sus respectivos blancos. De acuerdo con la Tabla 1, todos los materiales incrementan su área superficial, en los FM en un 8.8% con AH, un 13.7% con AO y en un 5.3% con AA. En los VVC en un 4.2% con AH, en un 9.2% con AO y en un 17.6% con AA. En los VVI en un 11.8% con AH, en un 17.6% con AO y en un 165% con AA. La variación en la superficie específica de estos materiales supone una mejora en la capacidad de su disolución. Durante este ciclo los tres materiales presentan diferencias significativas entre ellos a un intervalo de confianza del 95%.

Segundo ciclo: Al comparar el área superficial medida a los FM, los VVC y los VVI en el estado inicial, con los obtenidos en el primer ciclo, y con los obtenidos en el segundo ciclo, bajo el efecto del AH, AO y AA y sus respectivos blancos, está se incrementa notoriamente en todos los materiales, como se puede ver en la Tabla 1, durante este ciclo, en los FM, en un 37.6% con AH, un 3.5% con AO y en un 9.7% con AA. En los VVC en un 4.2% con AH, en un 9.9% con AO y en un 2.1% con AA. En los VVI en un 58.8% con AH, en un 70.6% con AO y en un 5.9% con AA.

Los VVI, incrementan más su área superficial con AO, luego con AH y, por último, con AA, sin el efecto de los reactivos (blancos), el incremento es mayor con AH, luego con AA y, por último, con AO.

Los VVC incrementan más su área superficial bajo el efecto del AO, luego con AA y, por último, con AH, sin el efecto de los reactivos, la relación se invierte siendo mayor el área superficial con AA, luego con AO, y por último, con AH. En los FM bajo el efecto de los reactivos, el mayor incremento del área superficial se logra con AH, luego con AA, por último, con AO; sin el efecto de los reactivos los AH son los que más incrementan el área seguidos del AO y luego del AA. Durante este ciclo los tres materiales presentan diferencias significativas entre ellos a un intervalo de confianza del 95%.

Tercer ciclo: Al comparar el área superficial medida a los FM, los VVC y los VVI en el estado inicial, con los obtenidos en el primer y segundo ciclo con los de este ciclo, bajo el efecto del AH, AO y AA y sus respectivos blancos, puede observarse, como se muestra en la Tabla 1, que en todos los materiales ésta se incrementa notoriamente; un caso muy particular lo traen los FM, que aumentan su área específica desde un valor inicial de 22.6225 m²/g, al inicio, hasta un valor de 28.0100 m²/g, bajo el efecto del AH, y hasta 28.8800 m²/g, sin el efecto del AH, en el

tercer ciclo. Durante este ciclo los FM incrementan su área superficial en un 23.9% con AH, un 17.3% con AO y en un 14.6% con AA. En los VVC en un 37.3% con AH, en un 33.8% con AO y en un 31% con AA. En los VVI en un 171% con AH, en un 94.1% con AO y en un 100% con AA; sin el efecto de los reactivos (blancos), el mayor incremento del área superficial de los VVI y de los FM es mayor con AH, luego con AO y, por último, con AA, en los VVC el incremento del área superficial es más alto con AA, luego con AO y por último con AH pero, los valores entre estos son realmente muy cercanos. Durante este ciclo los tres materiales presentan diferencias significativas entre ellos a un intervalo de confianza del 95%. Con y sin el efecto de los reactivos, el que más incrementa el área superficial específica en los tres materiales es el AH, luego el AO y, por último, el AA. Durante los tres ciclos bajo el efecto de los reactivos, los tres materiales presentan diferencias significativas tanto, entre ellos, como entre los ciclos y entre los reactivos, sin el efecto de los reactivos los tres materiales presentan diferencias significativas entre los tres ciclos excepto en los VVI que no tienen diferencias significativas en el primer y tercer ciclo con AA y en los VVC en el primer y segundo ciclo con AH, estos comportamientos se pueden observar en la Figura 5.

Conclusiones

Los FM son los materiales que presentan mayor superficie específica, mayor superficie de reacción, mayor número de rasgos de alteración superficial como consecuencia de la disolución en AH, AA y AO y son los que producen mayores cantidades de iones de Al^{3+} , Si^{4+} y Fe^{3+} , por ende, son los más susceptibles de ser meteorizados, siguen a estos los vidrios volcánicos.

Dentro de los vidrios volcánicos se diferencian los VVC y los VVI, de estos dos son más susceptibles de meteorizarse los primeros y las velocidades de disolución entre ellos son bastante diferentes; en los vidrios incoloros son extremadamente lentas hecho que hace que sean considerados como un material inerte frente a los procesos de disolución, por lo menos, en la meteorización experimental con AA, AO y AH, durante dos años.

Con el tiempo de disolución se observa un incremento en la alteración de estos materiales, en ellos, muchos rasgos se multiplican y se acentúan fuertemente. En los FM es donde se evidencian mayores marcas o rasgos de alteración y de los vidrios son más afectados los VVC que los VVI, en éstos, solo se manifiestan a partir del segundo ciclo y son, por lo general, leves, comparadas con las observadas en los FM y en los VVI.

Los rasgos más frecuentes que aparecen en las superficies de estos materiales son: Presencia de bordes lisos, redondeados, aserrados o dentados, comúnmente en los VVI; bordes angulosos y con terminaciones ahusadas, frecuentes en los FM y en los VVC. En los VVC se presentan anillos de hidratación como respuesta del estado de hidratación de éstos. En los VVI se observan superficies lisas sin huellas de disolución y pueden existir granos con superficies corroídas, aunque este rasgo es mucho más frecuente al final del último ciclo de disolución mientras que en los VVC y en los FM se presenta desde su estadio inicial y va aumentando a medida que aumenta el tiempo de disolución. En los FM y en los VVC se observan superficies pulverulentas, acanaladas, escamosas, descascaradas, reticuladas, crateriformes y son comunes las estructuras surcadas, punteadas, verrucosas, botroidales o ampolladas, granuladas, ruminadas, estriadas y fenestradas; en los VVI son más frecuentes las superficies especuladas, alveoladas y foveoladas.

En cuanto a la forma como se fracturan predominan la concoidea y la irregular en los tres materiales y son comunes las superficies extremadamente angulosas. Esta meteorización se ratifica en el incremento del área superficial específica medida en los tres materiales, en los cuales aumenta notoriamente a medida que avanza el tiempo de disolución, siendo mucho mayor en los FM, luego en los VVC y por último, en los VVI. Bajo el efecto de los reactivos, los tres materiales presentan diferencias significativas tanto, entre ellos, como entre los ciclos y entre los reactivos; sin el efecto de los reactivos los tres materiales presentan diferencias significativas entre los tres ciclos, excepto en los VVI que no tienen diferencias significativas en el primer y tercer ciclo con AA y en los VVC en el primer y segundo ciclo con AH.

Los resultados de esta investigación motivan un cambio en los planteamientos actuales sobre los procesos de andolización; en este caso, se toma en consideración lo observado por los autores en otras investigaciones en cuanto a considerar como material parental de los Andisoles, únicamente a las cenizas volcánicas, y dentro de ellas, a los VV y a los FM. Estos materiales comparten rasgos comunes y exclusivos como el tamaño, la alta superficie específica y su estado de meteorización previo, características que los hacen muy vulnerables a la meteorización una vez son depositados. En este aspecto, para el Soil Taxonomy (USDA, 1988) o el Sistema FAO (FAO, UNESCO, 1988) hay coincidencia en cuanto a que son suelos relativamente jóvenes con unas propiedades únicas que los distinguen pero hay contradicción en cuanto a lo que afirman que “...no siempre se desarrollan a partir de

piroclastos como ceniza volcánica...”, dentro de la definición del Andisol involucran a las pómez, tufitas, cinders, lahar y otros, que por su tamaño o forma de depositarse deben soportar una fragmentación para dar paso a la meteorización a través de la cual se producen los iones Al, Si y Fe que luego se forman los mbgc, como la alófana, la imogolita, etc. En este sentido, todos los suelos que se producen a partir de otras rocas volcánicas como es el caso de la ignimbritas, las andesitas, los basaltos, también serían Andisoles. Las cenizas volcánicas ayudadas por las altas precipitaciones, el buen drenaje que asegure el lavado de bases y la presencia de carbón orgánico, se meteorizan y forman Andisoles bajo dos situaciones:

1. A $\text{pH} < 5.0$, los FM, y los VV, se meteorizan y producen cantidades apreciables de Al, Si y Fe, la materia orgánica compleja el Al y el Fe y forma complejos Al-humus y Fe-humus, y el Si, se precipita y forma ópalos o se lixivia en condiciones de máximo lavado. Si el pH es demasiado ácido, predomina la forma protonada. Esta situación se considera como antialofánica ya que impide la formación de la alofana y la imogolita. En esta investigación no fue posible comprobar este efecto debido a que en ninguno de los sistemas establecidos con los tres materiales y los tres reactivos el pH fue inferior a 5.0, solo en algunas reacciones cuando se analizó los productos de actividad iónica y los sistemas estaban insaturados, fue posible establecer un efecto antialofánico, tal es el caso de los VVC o de los VVI en los blancos del AA o del AO pero, en el segundo ciclo.
2. A $\text{pH} > 5.0$, estos materiales se meteorizan pero la presencia de materia orgánica no alcanza a afectar el Al ni el Fe, entonces el Al y el Si se unen y forman aluminosilicatos y el Fe forma ferrihidrita.

En esta investigación se pudo comprobar que debido a la meteorización de los FM y de los VV a rangos de pH entre 6.0 y 7.2, se producen cantidades suficientes de Al, Si y Fe requeridas para la formación de mbgc, de estos iones, las concentraciones más altas son de Si, hecho que permitiría, si fuera el caso, que se produzcan alófanos ricos en Si (imogolitas). Sin embargo, se requiere de otros factores y cambiar algunas condiciones experimentales para que se formen estos materiales. En ambas situaciones los VV no alcanzan a disolverse totalmente y, quedan en el suelo como depósitos de iones de Al, Si y Fe, esencialmente.

Agradecimientos

Los autores desean expresar un especial agradecimiento a los doctores Raúl Zapata, Raúl Madrinan y Daniel

Jaramillo por la asesoría en lo relacionado a la investigación; del mismo modo al Ingeniero Hernán González de la Universidad Nacional de Colombia por todo el apoyo logístico. A los Ingenieros Orlando Ruiz, Gloria Arango y Gladys Acosta por el apoyo en el trabajo analítico. Al Ingeominas Bogotá y al Laboratorio de Microscopía electrónica de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín por las fotografías en SEM. Al Centro de Investigaciones Ambientales y de Ingeniería (CIA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia, a la Universidad Nacional de Colombia, sede de Medellín y al Instituto Agustín Codazzi por el tiempo de los investigadores.

Bibliografía

- Araña S. V., & J. L. Ruiz.** 1974. "Volcanismo, Dinámica y Petrología de sus productos", Ediciones Istmo. Madrid. 220 p.
- Besoain, M. E.** 1972. Mineralogía de las arcillas de los suelos derivados de ceniza volcánica. En: Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina; Turrialba, Costa Rica, 6-13 de junio, p B1.1-B1.13.
- Branauer, D.G.; P.H. Emmett & E. Teller.** 1938. Adsorption of gases in multimolecular layer. In: Journal of the American Chemical Society. 60: 309-319.
- Fisher, R. V. & H. U. Schmincke.** 1984. Pyroclastic Rocks. Springer Verlag. Berlin. 472 pp.
- Flórez M. M. T.,** 2004. Meteorización experimental de los fragmentos de matriz y los vidrios volcánicos. Tesis Ph. D. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira. 300p.
- . 2000. Génesis de suelos y paleosuelos ándicos a partir del estudio de pedocomponentes. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 190 p.
- & **L. N. Parra.** 1992. Características texturales en los componentes de las tefras del Norte de la Cordillera Central de Colombia In: Boletín Ciencias de la Tierra No. 11 p 81-104.
- Heiken G. & K. Wohletz.** 1985. Volcanic ash. Univ. of California. Press, Berkeley. C.C. In: Encyclopedia of volcanoes. Ed. Haraldur Sigurdsson. Wiley N.Y. p. 1155.
- Hermelín, M.** 1980. Clasificación de algunos minerales con base en su resistencia a la meteorización química en condiciones tropicales húmedas. Inédito. Medellín 117 p.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC.** 1991. Génesis y taxonomía de los Andisoles Colombianos. Investigaciones. Vol. 3. No. 1. Santafé de Bogotá. 118 p.
- Luna Z. C.** 1963. Anotaciones pedológicas sobre algunos Andosoles de Antioquia. IGAC. Vol. 4, No. 9. Bogotá. Colombia.
- Shoji, S.** 1993. Mineralogical properties of volcanic ash soils. In: N. Yoshinaga (Editor), Volcanic ash soil. Genesis, Properties, Classification. Hakuyusha, Tokyo, pp. 31-72.
- , **R. Dahlgren & M. Nanzyo.** 1993. Genesis of volcanic ash soils. In: Volcanic ash soils: Genesis, properties and utilization. Developments in Soil Science 21. pp: 37-71. Elsevier.
- Silva P. F.** 1953. Comparación de dos sistemas de análisis físico mecánico en suelos tropicales. Medellín. Tesis Univ. Nacional. 121 p.
- Soil Survey Staff (Usda).** 1998. Keys to soil taxonomy. 8ª. Ed. Usda. Washington D. C. 326 p.
- Sparks R. S. et al.** 1977. Volcanic plumes. In: Encyclopedia of volcanoes. Ed. Haraldur Sigurdsson. Wiley N.Y. pp 916-918.
- Turner, F. J. & J. Verhogen.** 1978. Petrología ígnea y metamórfica. Ed. Omega. 726 p.
- Wada, K.** 1977. The distinctive properties of Andosols. In: Advances in soil science. Edited by B.A. Stewart. Springer-Verlag. New York.
- Walker, G. P.** 1971. Grain-size characteristics of pyroclastic deposits. J. Geol. 79: 696-714.

Recibido el 18 de febrero de 2005.

Aceptado para su publicación el 9 de noviembre de 2005.