

IDEAS GENERALES SOBRE METEORIZACIÓN

Julio González¹, Fernando Guerra², Heriberto Gómez³ y Graciano Elizalde⁴

Universidad de Los Andes. Departamento de Ciencias Sociales, ULA-Táchira

Universidad Central de Venezuela, UCV. Facultad de Agronomía.

Recibido: abril 2004

Aceptado: octubre 2004

Resumen

La utilización y aplicabilidad del concepto de meteorización, principalmente en el campo de la Geografía y de las Ciencias de la Tierra, ha evolucionado y se ha actualizado producto del gran número de trabajos realizados en este campo de investigación. Mas las referencias y tratamientos dados al mismo, en la mayoría de los casos, aún no despejan algunas interrogantes en relación con la naturaleza conceptual y alcance de los términos que definen y se relacionan con el fenómeno. Esto ha dificultado la unificación de concepciones y criterios, lo que genera en el usuario confusión en torno al planteamiento de los aspectos referidos al tema, según la disciplina y las fuentes consultadas. Este ensayo tiene como objeto mostrar, a partir de una revisión documental, el estado actual de la discusión de los conceptos fundamentales (agentes, procesos, factores, fuerzas, productos, tasa e intensidad de la meteorización), los niveles de abstracción material-espacial (minerales, rocas, regolitos, sedimentos, suelos) y los enfoques de estudio actual en relación con este concepto (termodinámico y cinético). Con ello se quiere dejar en manos de los docentes y estudiantes una referencia que facilite la comprensión integral de este concepto y coadyuve, de la mejor manera, al proceso de enseñanza-aprendizaje.

Palabras claves: Meteorización, Sedimentos, Regolito, Suelo

GENERAL IDEAS ON WEATHERING

Abstract

The use and applicability of the weathering concept, mainly in the field of the Geography and Earth Sciences, doubtlessly have evolved. In fact, it has been updated as a result of the great number of works that are made in this field of investigation. Nevertheless, references and given treatments to this concept, in most of the cases, make not yet clear some questions in relation to the conceptual nature and reaches of the terms, which are related to define this complex phenomenon. This has made difficult to the unification of conceptions and criteria for the analysis and methods as well as the approaches for its study. Although interesting by the scientific level of the discussion, the above stated generates at level of the user, in our case teachers and students, diversity in the exposition of the aspects referred to the subject according to the discipline and sources. This essay aims to show, from a documentary revision, the present level of discussion from fundamental concepts (agents, processes, factors, forces, products, rate and intensity of the weathering), the levels of material-space abstraction considered for the study of the weathering (mineral,

¹Ing. Forestal, Msc en Ciencias del Suelo. Email: jtovar@ula.ve

²Geógrafo. Email: fguerra@ula.ve

³Geógrafo, PhD en Geografía. Email: hgomez@ula.ve

⁴Ing. Agrónomo, PhD en Sedimentología. Email: elizalde@agr.ucv.ve

rocks, regoliths, sediments, soils) and the approaches of present studies in relation to this concept (thermodynamic and kinetic). The idea is to leave into the hands of both teachers and students a reference that facilitates the integral understanding of this concept and helps, in the best way, to the teaching-learning process.

Keywords: Weathering, Sediments, Regolith, Soil

Introducción

Este trabajo es el producto del análisis de inquietudes manifestadas por los cursantes de las asignaturas del Área Ciencias de la Tierra, en relación con el concepto de meteorización. Dichas inquietudes formaron parte de las discusiones que se abordaron en un curso de mineralogía de suelos, realizado como parte del adiestramiento requerido para la elaboración de un proyecto de investigación que busca delimitar unidades de paisaje en la cuenca de la quebrada La Bermeja en San Cristóbal, estado Táchira. Su publicación obedece a que en el componente Ciencias de la Tierra de la carrera de Educación, mención Geografía y Ciencias de la Tierra, este fenómeno natural se estudia en casi todas las asignaturas, pero con enfoques y planteamientos diversos, lo que, en muchas ocasiones, causa confusión y debate con los educandos. De forma que, esta publicación es parte del esfuerzo de la unidad académica por lograr una coordinación interna en el desarrollo de algunos contenidos temáticos fundamentales.

La diferencia conceptual se observa también en los textos que posteriormente se utilizan en la enseñanza de las Ciencias de la Tierra en educación media diversificada. Esta situación se debe, en parte, a que se está tratando de comprender un fenómeno muy complejo. Por otro lado, la meteorización participa en forma diferencial en la génesis de varios cuerpos naturales (regolitos, sedimentos, suelos), objeto de estudio por parte de diferentes disciplinas en las que se realizan investigaciones, muchas veces, para resolver problemas específicos, con resultados no totalmente extrapolables a otras áreas del conocimiento.

Actualmente, el volumen de trabajos publicados sobre el tema en las revistas especializadas, es muy alto, incluyendo ahora, muchas investigaciones en el campo de la construcción e ingeniería, por el efecto de este fenómeno sobre monumentos arquitectónicos como el Partenón, el Taj Mahal y un sinnúmero de catedrales y esculturas en diferentes partes del mundo; también en la oxidación de estructuras metálicas, automóviles, barcos, entre otros. Conociendo, además, que cualquier documento elaborado sobre el tema, queda casi desactualizado antes de ser publicado, se consideró prudente expresar estas ideas, con las cuales, al nivel de educación media y diversificada, se expone el estado del arte sobre este importante fenómeno. En este sentido, se busca facilitar su comprensión y las causas de los diversos enfoques a objeto de ayudar, de alguna manera, en la labor docente, sobre todo en el desarrollo de nuevas estrategias de enseñanza-aprendizaje.

El concepto de meteorización

Porta, López, y Roquero (1994) señalan que en la literatura en español se utilizan tres términos para referirse al mismo fenómeno: meteorización, alteración e intemperismo. Sin embargo, muchos autores, entre ellos Malagón (1979), consideran que existen diferencias

semánticas importantes entre los términos. Al respecto, Porta et al. (1994) indican que esas diferencias se originan de diversas traducciones de “weathering”, derivado de “weather” (tiempo atmosférico). En sus discusiones, estos autores, señalan que los términos meteorización e intemperismo se han generalizado en los países latinoamericanos y que el término alteración se ha posicionado en los autores francófonos. Vale acotar, que en este trabajo no se discute la conveniencia de utilizar un término u otro, de tal manera que en toda la discusión se utilizarán como sinónimos, aunque con cierta preferencia por el uso de meteorización, debido a su popularidad en muchos de los textos latinoamericanos.

La evolución del concepto de meteorización plantea, a su parecer, dos grandes líneas de pensamiento, muy interesantes y no excluyentes. Por un lado, autores como Lougham (1969) y Bohn, McNeal, y O’Connors (1993), que en sus definiciones hacen, principalmente, énfasis en los “procesos”, tanto físicos como químicos, y más recientemente biológicos, que afectan a las rocas y minerales en la superficie terrestre. Por otro lado, autores como Rieche (1950), Malagón (1979), Porta et al. (1994) y Summerfield (1997), quienes en sus planteamientos se centran en los “cambios” que sufren las rocas y los minerales en respuesta a los procesos desencadenados por las condiciones prevalecientes en la superficie terrestre. Ésta probablemente sea la razón por la cual Ahnert (1996), define meteorización con base en tres de sus aspectos fundamentales:

- El efecto de los procesos atmosféricos sobre rocas y minerales.
- La adaptación de las rocas y minerales a las condiciones ambientales en la superficie terrestre.
- La preparación de los materiales (rocas) como un paso previo para su remoción por procesos de denudación y erosión.

Elizalde (1999), en un desarrollo sistemático sobre la alteración de minerales, señala que la meteorización se expresa como cambios de magnitud variable en los minerales, pero destaca, que estos cambios son el resultado de unos procesos que se generan por la interacción entre los minerales y los agentes de la meteorización (agua, CO₂, O₂, H⁺, entre otros). La cantidad, naturaleza del agente y el tiempo de interacción de éste con el mineral, están controlados, según el autor, por los que denomina “factores de intensidad”, a la vez que las características propias del mineral, que determinan su vulnerabilidad o alterabilidad, constituyen los “factores de capacidad”.

Otras ideas interesantes son las de Pedro (1961), quien al referirse a la meteorización, parecería tratar de englobar a los factores, agentes y los procesos, que sufren rocas y minerales agrupándolos con todos los cambios: físicos, químicos y mineralógicos. Este planteamiento estaría también en concordancia con las ideas de Bland y Rolls (1998), al señalar que la meteorización engloba a los cambios (alteración) desencadenados por procesos químicos, mecánicos y biológicos de las rocas y minerales cerca de la superficie, en respuesta a las condiciones ambientales.

La mayoría de las definiciones hasta ahora comentadas, hacen énfasis en que la meteorización actúa sobre rocas y minerales. Sin embargo, Elizalde (1983) define al paisaje como una entidad espacial o geográfica que es parte del ecosistema y está compuesta de rocas, regolitos, sedimentos y agua. A su vez, Elizalde y Jaimés (1989)

exponen que uno de los grandes procesos que determinan la evolución del paisaje es la alteración o meteorización. Ello es congruente con la tendencia moderna expuestas por Porta *et al.* (1994), quienes plantean que, además de las rocas y minerales también sufren meteorización, los suelos y los sedimentos. A ello habría que agregarle (como propone Elizalde, 1983) el regolito, que es considerado por Summerfield (1997), como un cuerpo producto de la meteorización de las rocas, pero donde ésta sigue actuando durante su diferenciación y evolución.

Existe acuerdo en señalar que la meteorización ocurre en la superficie de la corteza terrestre y además se trata de precisar esa ubicación, al indicar que es una interfase donde interactúan litosfera-atmósfera-hidrosfera y para muchos autores como Rieche (1950) quizá más importante, la biosfera. Sin embargo en la práctica, delimitar precisamente esta interfase no es fácil, porque algunos de sus límites son difusos. También hay consenso en la bibliografía consultada, en señalar que la meteorización se produce debido a que los minerales y las rocas no se encuentran en equilibrio con el ambiente superficial, o sea, es una respuesta a las condiciones prevalecientes en la superficie terrestre, tal y como lo plantea Summerfield (1997). Esto se debe, entre otras causas, a que la mayoría de los minerales denominados primarios, y en particular aquellos que constituyen las rocas ígneas y metamórficas, se han formado en profundidad. Sin embargo, no debe olvidarse que entre los productos de la meteorización se encuentran los llamados minerales neoformados o secundarios, originados a partir de los primarios o de los productos liberados durante la alteración de éstos.

Los minerales secundarios se desarrollan en superficie y son componentes abundantes en algunas rocas sedimentarias (lutitas, areniscas), suelos y regolitos. Estos minerales son estables en las condiciones superficiales en las cuales se formaron, pero tal y como lo plantea Kittrick (1977), ellos pueden hacerse inestables y también sufrir meteorización, si esas condiciones superficiales varían. En este sentido, Elizalde (1999) señala que cuando las condiciones ambientales evolucionan, los minerales son sometidos a tensiones que provocan la modificación de las estructuras y de la composición química. De hecho, según Bohn *et al.* (1993), la meteorización continúa después de la formación de los minerales secundarios, particularmente los arcillosos, debido a que éstos son estables en ciertos límites de concentración de elementos en el medio (sílice soluble, cationes de metales alcalinos y alcalino térreos e hidrógeno, entre otros). A juicio de este último autor, a medida que los solutos se lixivian (pierden) durante un largo período, en ambiente de meteorización severa, el proceso continúa sobre los minerales secundarios iniciales, hasta alcanzar estados químicos más estables. Por lo tanto, tal y como lo plantea Elizalde (1999), algunos minerales secundarios resultan de la alteración de otros minerales secundarios.

Factores de la meteorización

La bibliografía revisada se concentra en mencionar cuáles son los factores de la meteorización, su participación aislada o combinada en el fenómeno y en resaltar que los factores determinan la tasa y naturaleza de los procesos de la meteorización. En el material consultado no se observó una homogeneidad de criterio con relación a qué se entiende por factor y cuáles son los factores de la meteorización. En este marco de ideas, de acuerdo con Elizalde (1999), los factores de la meteorización pueden dividirse en factores de

capacidad, relacionados con las propiedades de los minerales y los factores que controlan la intensidad de los procesos de alteración, los cuales son principalmente tres: clima, topografía y drenaje. Mientras que Cooke y Doornkamp (1990), señalan que la naturaleza y la efectividad de algún proceso o grupo de procesos de la meteorización, depende, principalmente, de tres conjuntos de variables (factores de la meteorización):

- El ambiente de meteorización, en el cual las condiciones del clima son de gran importancia y donde incluye además elementos locales como la posición topográfica, el drenaje y edad de la superficie.
- La naturaleza de los materiales, donde incluye la litología y estructura.
- Las condiciones biológicas, en la cual considera de forma general, la naturaleza de la vegetación y de la vida animal.

López *et al.* (1992), por otro lado, dividen los factores de la meteorización en endógenos y exógenos. Consideran como parte de los primeros, las propiedades del material de partida, tales como la naturaleza y organización de poros y fracturas y la composición mineralógica, mientras que como factores exógenos, incluyen el clima y la vegetación. Bland y Rolls (1998), concuerdan, en forma general, con ese planteamiento, pero consideran como factores exógenos a la temperatura del ambiente de meteorización y a la química e hidrodinámica de los fluidos, las cuales, a su juicio, son quienes influyen directamente en la tasa e intensidad de la meteorización. Sin embargo, resaltan que estos factores están indirectamente afectados por controles climáticos, geomorfológicos y de cobertura vegetal.

En el caso de los factores formadores de suelos, Rondón y Elizalde (1997), luego de analizar las propuestas de varios autores, proponen una definición donde se plantea que un factor de formación de suelos, es un agente, una fuerza, una condición, una relación o una combinación de ellos, que afecta, ha afectado o puede influir sobre el material que constituye el suelo, determinando sus propiedades y con la potencialidad para cambiarlo, ya que influye sobre la naturaleza y la cuantía de la materia y energía de que dispone el sistema para el desarrollo de los procesos que en él ocurren. Esta definición bien interesante podría adaptarse, en cierta medida, a los factores de la meteorización, si se parte de las ideas de Elizalde y Jaimes (1989) y de Curtis, citado por Summerfield (1997), quienes concluyen, que los factores que controlan la meteorización química y la meteorización como un todo, son los mismos cinco factores reconocidos que controlan el desarrollo del suelo, es decir: clima, material parental, relieve, actividad orgánica y tiempo. Este planteamiento de manera esquemática se muestra en la figura 1, donde se observa, cómo estos factores influyen en la termodinámica y cinética de las reacciones de meteorización, conceptos éstos que serán desarrollados posteriormente, pues son los dos enfoques principales para el estudio de este importante fenómeno natural.

Los procesos de la meteorización

Se halla abundante bibliografía sobre los procesos de la meteorización. Pero pocas referencias son las que tratan de precisar qué se entiende como tal. Clásicamente se han dividido en aquellos que involucran reacciones químicas y, en muchos casos, dependiendo de la intensidad con que actúen, la formación de nuevos minerales (procesos químicos) y aquellos que participan en cambios físicos, como tamaño y coherencia de las partículas

(procesos físicos). Ello ha sido la base para clasificar a la meteorización en química y física, esta última también llamada mecánica. No obstante, algunos autores, ejemplo, Muñoz (1995), señalan que esta clasificación, ciertamente útil y cómoda a efectos de análisis, resulta imprecisa. Summerfield (1997), plantea que las diferencias entre estos tipos de meteorización son claras en teoría, pero en la práctica los procesos muy raramente operan de manera separada; en general, el efecto de uno ayuda o controla el funcionamiento del otro. Porta et al. (1994), en el mismo sentido, indican que los procesos de la meteorización se estudian separadamente por razones de claridad en las exposiciones, pero reiteran que esto no se corresponde con la realidad. Goudie, Malcom, Burt, Lewin, y Richard (1981), en la misma línea de pensamiento, plantean que los resultados de la meteorización reflejan el efecto combinado de varios procesos diferentes, importancia relativa.

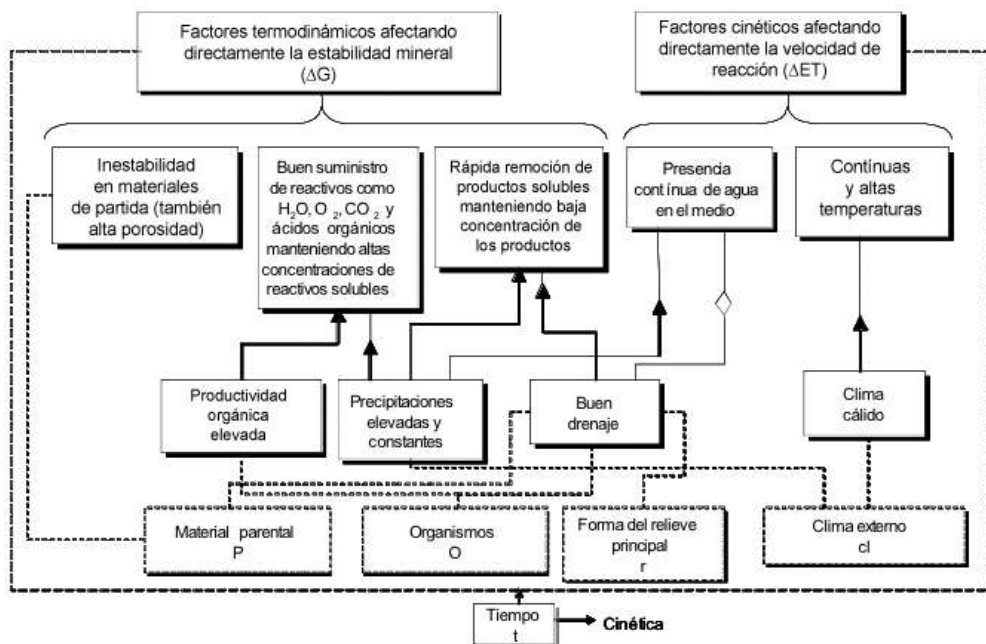


Figura 1. Representación esquemática de cómo los factores contribuyen a la tasa de meteorización. Adaptado de Summerfield (1997)

De acuerdo con Summerfield (1997) una roca finamente dividida (partículas de menor tamaño y mayor superficie específica) por alteración física, será más susceptible a la alteración química debido al aumento de la superficie de ataque físico químico. Así mismo, los procesos físicos causan fisuras por donde los procesos químicos toman lugar con mayor intensidad.

Es importante resaltar aquí, que existen procesos químicos de la meteorización, que en Ciencias del Suelo se consideran propios de ese cuerpo natural o, según Elizalde, Viloria y Jacome (2000), tienen allí su mayor intensidad. Por ello autores como Buol, Hole, y

Mc Cracken (1981), apoyan la idea de subdividir a la meteorización química en: meteorización geoquímica, para referirse a aquella que ocurre bajo el solum del suelo, y meteorización edafoquímica, a la producida en el interior del suelo propiamente dicho.

Fassbender (1980), agrupa los procesos de la meteorización en físicos, químicos y biológicos. Si se consideran los planteamientos anteriores, ello llevaría a hablar de la meteorización biológica. Un término evitado por algunos autores, por ejemplo, Cooke y Doornkamp (1990) desarrollan en sus trabajos la meteorización física y química, pero prefieren utilizar el término actividad biológica, en lugar de meteorización biológica. No conforme con esto, los autores antes citados, al analizar los procesos de la meteorización incluyen los términos procesos orgánicos como una categoría dentro de los procesos físicos y el término cambios químico biológicos como una categoría dentro de los procesos químicos.

Muñoz (1995), plantea que los procesos y su competencia resultan de una interacción entre lo que denomina factores ambientales o atmosféricos y unos factores estructurales. Señala como ejemplo, que el repetido desarrollo de ciclos de congelación y deshielo, no produce fragmentación de las rocas si éstas no presentan una porosidad o sistema de fisuras que posibilite la penetración del agua. Aquí entonces es importante destacar las ideas de Elizalde (1999), al señalar que los procesos de la meteorización son una respuesta a la acción de los agentes de la meteorización, en otras palabras, el proceso es el producto de la interacción del (los) agente(s) con la roca o mineral. El autor considera el agua y la temperatura como agentes de particular importancia. Este planteo de Elizalde (1999), realmente lleva a la necesidad de pensar sobre el papel de los organismos en la meteorización, debido a que en algunos casos ese rol parecería más idóneo como agente que como proceso, mientras que en otros casos, por ejemplo, cuando se liberan ácidos orgánicos que luego participan por complexación en la transformación de las rocas y minerales, su papel podría considerarse como el de un factor de la meteorización.

En la actualidad está ampliamente demostrado que los seres vivos se encuentran en las regiones más inhóspitas del planeta y la dificultad para precisar el papel de los mismos en la meteorización parece compartida por otros autores, por ejemplo Porta *et al.* (1994), quienes al referirse a la meteorización biológica, señalan que en este caso se le da preponderancia al agente de la alteración: los seres vivos y los productos que liberan. Por otro lado, según Bland y Rolls (1998), las causas del colapso de rocas y minerales son los procesos físicos y químicos, indicando que, frecuentemente, estos procesos son desencadenados por organismos vivos en una zona donde se concentra su actividad, tradicionalmente conocida como "biosfera". No obstante, la contribución de los organismos la hace tan particular que ha conducido a darle un carácter distintivo y por ello se ha popularizado el término de meteorización biológica como una categoría separada.

Tradicionalmente, los procesos sean estos físicos o químicos, se definen de acuerdo con el principal agente responsable de su desarrollo. Son comunes términos como oxidación, hidrólisis entre otros. Por otro lado, en el caso de los procesos físicos autores como Ahnert (1996), prefieren clasificarlos de acuerdo con el tamaño de los materiales que se producen como consecuencia de los mismos, por ello habla de desintegración

granular y en bloques. Mientras que Elizalde (1999) los agrupa en fragmentación por choque y rozamiento, poco común en la literatura clásica, y fracturación por dilatación y contracción.

Los procesos físicos de acuerdo con Porta *et al.* (1994) pueden dividirse en efecto descarga (exfoliación por liberación de presión, según Ahnert (1996)), termoclastia, cristalización de agua intersticial (gelifracción), halocinesis (cristalización de sales), la mayoría de los cuales, tiene su fundamento en cambios volumétricos en la masa del material de partida o en el volumen del material que se introduce por las fisuras o espacio poroso de las rocas.

Para Summerfield (1997) por ejemplo, algunos de los procesos químicos son: solución (disolución), hidratación, hidrólisis (considerado de mayor importancia), carbonatación, oxidación, reducción e intercambio iónico. Es bueno destacar que, en la actualidad, existe cierta discusión en el sentido de considerar a la solución y a la hidratación como procesos eminentemente químicos. Algunos elementos sobre este último planteamiento pueden revisarse en Ahnert (1996). Para Elizalde *et al.* (2000), la mayoría de los procesos químicos antes descritos, forman parte de la meteorización geoquímica y señalan que existen otros procesos, que se agrupan bajo el término meteorización edafoquímica, propuesto según los autores por Jackson y Sherman en 1953, para referirse a aquellos que tienen su mayor intensidad en el solum. Los procesos que conforman la meteorización edafoquímica según Elizalde *et al.* (2000) y Adams (1995) son:

- Ciclos de oxidación y reducción.
- Paso alternativo del aluminio de las estructuras arcillosas hacia los óxidos hidratados a través de los sitios de intercambio.
- Remoción del potasio de las micas.
- Polimerización del aluminio en las capas intermedias de minerales arcillosos 2:1.

Se ha expresado que los procesos físicos y obviamente la meteorización física conduce a la desintegración, por ello algunos autores, como Cooke y Doornkamp (1990), prefieren ese término para referirse a estos procesos, que no causan, según Goudie *et al.* (1994), cambios significativos en la composición química y mineralógica. Sin embargo, en el caso de la desintegración granular, es decir, la separación de los granos (minerales, cristales) por debilitamiento de lo que los mantiene unidos, que ocurre, principalmente, en rocas sedimentarias clásticas y en rocas ígneas de textura fanerítica como el granito, son muchos los autores que señalan la necesidad de evaluar la importancia relativa de los procesos químicos. Por ejemplo, Summerfield (1997) plantea que procesos como la oxidación de minerales, caso de la biotita, y la hidrólisis de feldespatos, contribuyen significativamente a la desintegración. De hecho, parecería que la importancia relativa de la meteorización química en la desintegración no se ha establecido completamente.

Porta *et al.* (1994) señalan que las características climáticas y en particular los elementos precipitación y temperatura, determinan la naturaleza y la intensidad con que actúan los procesos y, por lo tanto, el producto formado, en otras palabras, los procesos como una función de las condiciones ambientales y el clima, en particular. Este planteamiento asume que la meteorización química incrementa en la medida en que mayor sea la

disponibilidad de agua y con el aumento de la temperatura (figura 2), de allí que se haya establecido que la meteorización química será más intensa en localidades húmedas y cálidas. Cooke y Doornkamp (1990) muestran gráficamente una relación entre precipitación, temperatura, los procesos, y obviamente, los tipos de meteorización (Figura 3). En ella se observa, que existen condiciones de temperatura y precipitación (regiones áridas y semiáridas o frías y secas), donde predominan los procesos físicos (meteorización física) y condiciones (húmedas y cálidas) donde aparecen con mayor intensidad los procesos químicos (meteorización química). Por supuesto, el clima es un factor de la meteorización que controla la disponibilidad del principal agente de la meteorización (agua) y claramente opera a diferentes escalas. En este sentido, se han realizado muchos intentos para expresar cartográficamente la variación espacial de los procesos de la meteorización, a escala global y regional, utilizando índices climáticos. Obviamente el predominio de un proceso o combinación de procesos repercute en los productos de la meteorización. De hecho Louhamg (1969) y Fassbender (1980) establecen una relación interesante entre el monto de la precipitación y su distribución, con el espesor del manto de alteración, la cantidad y tipo de mineral secundario que se forma y su distribución en el manto de alteración.

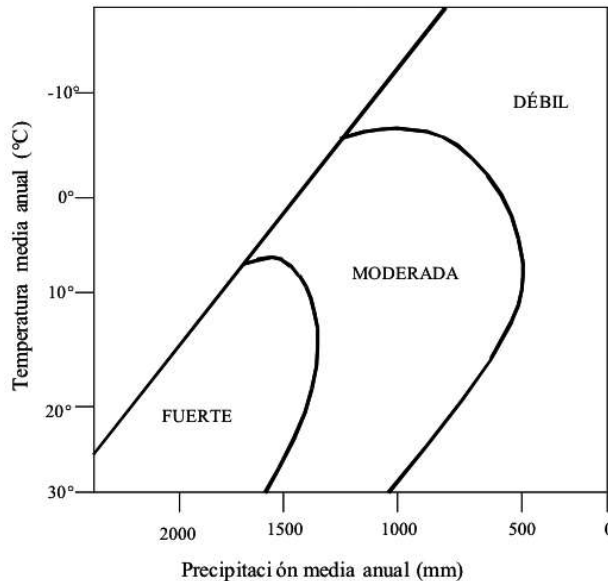


Figura 2. Regiones de intensidad de la meteorización química.

Fuente: Cooke y Doornkamp (1990).

En la figura 4, se presenta un esquema idealizado donde se sintetizan, a escala zonal, los efectos combinados de la temperatura y la precipitación en el desarrollo y diferenciación de los procesos de alteración.

En las zonas donde las condiciones ambientales (húmedas y cálidas) determinan la aparición de los procesos químicos, en ningún momento indica que los procesos físicos desaparecen, probablemente, su intensidad sea alta y muestra de ello son los cambios granulométricos, en porosidad y densidad, encontrados en los productos que muestran elevada intensidad de la meteorización.

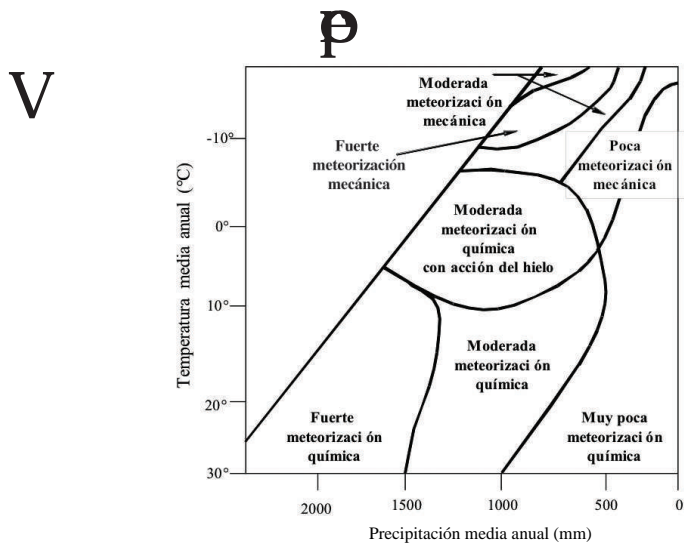


Figura 3.- Importancia de los diferentes tipos de meteorización en relación con las condiciones de temperatura y precipitación.

Fuente: Cooke y Doornkamp (1990).

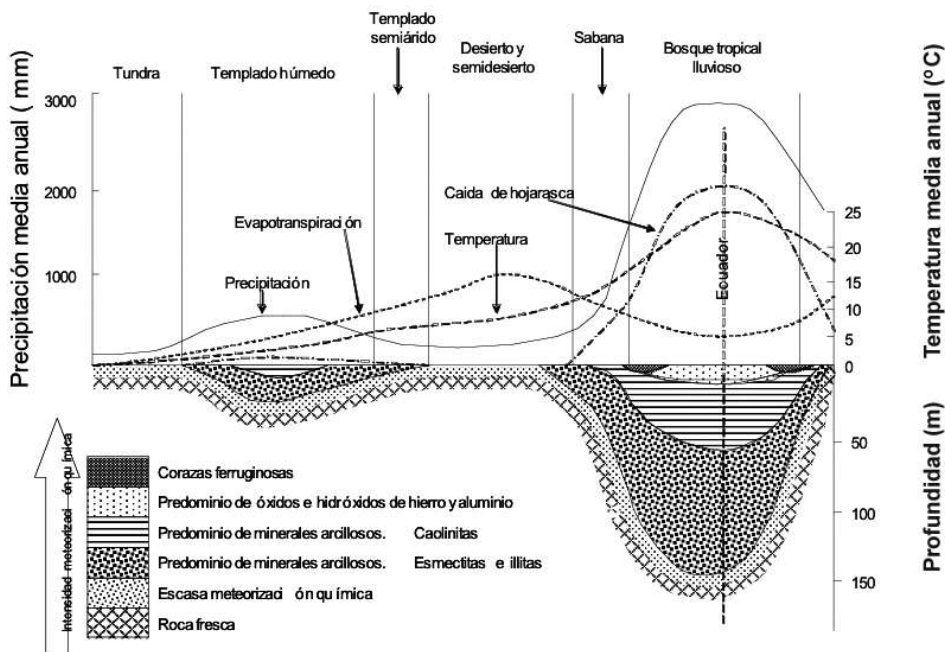


Figura 4.- Zonas de meteorización y clima. Adaptado de Strakhov, citado por López *et al.* (1992).

A pesar de lo expresado anteriormente, no debe olvidarse que el clima es uno de los factores de la meteorización, además, se debe considerar también que las relaciones factores, procesos, respuestas y la variabilidad espacial de los mismos no están totalmente

establecidas, o por lo menos, su conocimiento es incompleto. Aun más, los productos de la meteorización pudieran no estar acordes con las condiciones climáticas actuales. Por último, las relaciones temperatura-precipitación tienen un grado de complejidad importante.

En otro orden de ideas, y en relación con esta misma temática, se encontró en el material revisado, poco desarrollo sobre los procesos biológicos. Bland y Rolls (1998) los agrupan en biofísicos y bioquímicos. Estos autores consideran biofísicos aquellos casos donde el tejido de seres vivos penetra en las fisuras y grietas de los materiales, causando fragmentación como respuesta a cambios de volumen producidos por el crecimiento de sus órganos o por absorción de agua.

Para Bland y Rolls (1998) los procesos bioquímicos, cuyos mecanismos no son totalmente conocidos, se refieren, sobre todo, a las sustancias que son liberadas por los organismos, como parte de sus procesos vitales. Estas sustancias van desde el CO_2 , que se produce en grandes cantidades en condiciones aeróbicas, el H^+ o (H_3O^+), como parte de algunas actividades entre otras la nitrificación; hasta los ácidos orgánicos de menor masa molecular relativa (MMR). Estos últimos incluyen el acético, málico, oxálico, láctico, que dependiendo de su solubilidad, favorecen procesos químicos como la solución, carbonatación e hidrólisis y participan en la complejación, facilitando la movilización de elementos químicos, como el Al y el Fe y, en algunos casos, favoreciendo la cristalización de algunos minerales como la ferrihidrita.

Caso particular es el que se refiere a la síntesis de las sustancias húmicas como parte de la descomposición de la materia orgánica. Aquí, participan una amplia diversidad de seres vivos (lombrices, bacterias, hongos, actinomicetes, entre otros) y en la cual se producen los famosos ácidos fúlvicos y húmicos, de mayor MMR, típicamente edáficos para Porta et al. (1994), y de participación muy especial en la quelatación del Al, Fe, entre otros, y en la liberación, o al menos, puesta en solución de varios elementos químicos.

Los productos de la meteorización

Según Casanova (1996), las rocas son materiales sólidos constituidos, generalmente, por varios minerales. Elizalde (1999), al analizar la meteorización de las rocas destaca varios aspectos interesantes. En primer lugar, las rocas frescas (no alteradas) están compuestas de ciertos minerales cuya proporción tiende a disminuir con la meteorización. En segundo lugar señala, existen minerales que sólo se encuentran en el producto alterado (roca meteorizada); éstos son los minerales secundarios. Y, finalmente, indica que ciertos minerales presentes en las rocas frescas siguen encontrándose en las rocas meteorizadas, pero su proporción tiende a aumentar apreciablemente de forma relativa.

En resumen, la meteorización conduce a la pérdida de masa del sistema (roca o material de partida) y a la incorporación de agua. Sobre este último punto, Elizalde (1999) plantea que el contenido de agua en las rocas meteorizadas es muy superior que el de las rocas frescas. Este análisis de Elizalde (1999) es válido también para entender lo que sucede dentro de un mineral cuando se meteoriza. No hay que olvidar que Leet y Judson (1998) indican que en la definición de mineral, se debe incluir que estos pueden ser un elemento o un compuesto (combinación de dos o más elementos). De tal manera que sus constituyentes responden de manera distinta a los procesos de la meteorización, así que

algunos elementos tienden a concentrarse en el producto resultante (Al, Fe), mientras que otros desaparecen de manera más o menos acentuada (Na, Ca, Mg), en especial, los más solubles en estado iónico. El estudio de ese comportamiento condujo al desarrollo de la serie de movilidad relativa de los cationes de Goldich.

Adams (1995) resume lo que ocurre en la meteorización química dentro del suelo, en las siguientes etapas:

- Liberación de cationes alcalino y alcalino térreos en una cantidad considerable, durante la transición inicial de roca a suelo. No obstante el suelo no pierde inmediatamente estos cationes, debido a que existe intercambio y retención de los mismos.
- Liberación de sílice a la solución del suelo. Parte de la cual es lixiviada inmediatamente y parte queda reaccionando para formar minerales secundarios (caolinitas, esmectitas, cloritas, entre otros), comunes en los suelos, pero transitorios a la escala del tiempo geológico.
- El aluminio tiende a acumularse en los suelos.
- Las primeras etapas de la meteorización producen alcalinidad, mientras que las etapas posteriores producen acidez

Los planteamientos de Adams (1995) y Elizalde (1999) conducen a reflexionar en el sentido de que cuando se analizan los productos de la meteorización, no debe olvidarse que sufren este fenómeno natural los minerales, las rocas, regolitos y los sedimentos. En este marco de ideas, es importante también destacar que el regolito, según Summerfield (1997), es uno de los productos importantes de la meteorización de las rocas; que en los sedimentos, la meteorización es la fase inicial clave de preparación para que los materiales sean separados y transportados; y por último, tal y como lo indica Ahnert (1996), en la parte superior del regolito, y sirviendo éste como uno de los materiales de partida, se desarrolla otro cuerpo natural: el suelo. En otras palabras, la meteorización participa en la formación de los materiales de partida de los suelos y como parte importante de los procesos formadores (pedogenéticos) de suelo.

La participación de la meteorización en la formación de suelos es tan importante que algunos autores como Bohn *et al.* (1993), consideran el desarrollo del suelo como sinónimo de meteorización. No obstante, es muy importante destacar, que existen procesos de la meteorización que se consideran típicamente edáficos y que se requiere además, de la meteorización como proceso complejo, la participación de otros procesos formadores de suelo, entre ellos los que involucran a la materia orgánica (adiciones, transformaciones, entre otros) para que este cuerpo natural pueda desarrollarse.

Dependiendo de quien sufra la meteorización (material de partida), se tendrá un efecto obvio sobre la naturaleza del producto resultante y esto lleva a la necesidad de analizar la meteorización a diferentes niveles de abstracción. Es decir, siempre recordar que los elementos químicos son los componentes de los minerales, que a su vez, son los principales componentes de las rocas, y que tanto minerales como rocas constituyen la fase sólida de cuerpos (con otra dimensión espacial) de funcionamiento complejo (ejemplo: regolitos y sedimentos), los cuales son además, la materia prima para la formación del

cuerpo natural suelo. En otras palabras, no es lo mismo hablar de los productos de la meteorización de un mineral, que de los productos de la meteorización de una roca (asociación de minerales), ni mucho menos de los productos de la meteorización de un sedimento, que en oportunidades está constituido por varios tipos de roca.

Ahora bien, la fase sólida de regolitos, sedimentos y suelos, cuando presentan un alto grado de meteorización (intensidad), independientemente de su material de partida, tienden a homogeneizarse desde el punto de vista de la composición, presentando, principalmente, minerales secundarios del tipo caolinita y óxidos de hierro y aluminio. Ello implica que las características del material de partida, tienen un efecto determinante en la tasa de meteorización y en los productos iniciales o intermedios de la misma, pero no así en los productos finales.

El planteamiento anterior es válido para las condiciones de pH y Eh habituales, pero se hace imperante mencionar también, que existen ambientes de la meteorización donde las temperaturas y actividad biológica favorecen procesos como la complexación y la rápida remoción del hierro y aluminio. Por lo tanto, la acumulación de minerales formados a partir de esos elementos químicos pudiera restringirse considerablemente.

La hidrólisis en medio ácido se considera uno de los procesos químicos de la meteorización más importantes y ha constituido la base para el estudio de la misma, como reacción de equilibrio. Bajo este enfoque que conduce hacia el análisis termodinámico de la meteorización, Elizalde (1999) plantea que los productos de la meteorización de los minerales son: residuos insolubles, para referirse al resultado de la desintegración (meteorización física); productos neoformados (frecuentemente hidratados) e iones, para referirse al resultado de la descomposición (meteorización química); tal y como se muestra en la siguiente ecuación, denominada por el autor, ecuación fundamental de la meteorización (alteración):



Para Porta *et al.* (1994), los productos de la meteorización de las rocas son: resistatos, para referirse a los fragmentos de roca resultante de la meteorización física. Dependiendo de las transformaciones que pueda causar la meteorización química, los productos resultantes serán: minerales preexistentes en la roca o heredados, considerados resistentes a la meteorización; minerales con ciertas modificaciones (transformados) y minerales formados como resultado de la combinación de los productos liberados en la meteorización (neoformados). Considera también como productos de la meteorización, los materiales solubles (iones) que, dependiendo de las condiciones de drenaje, podrían ser expulsados del sistema.

Según Porta *et al.* (1994), los productos de la meteorización mencionados anteriormente conforman el suelo. Sin embargo, es necesario precisar que estos productos, además de conformar el componente sólido del suelo, pueden también ser parte del componente sólido de regolitos y de los sedimentos.

Intensidad y tasa de meteorización

Para referirse al grado o nivel de evolución que han alcanzado los materiales o cuerpos meteorizados se hace referencia en la literatura básicamente a dos términos o conceptos que sirven de indicadores en relación con este aspecto: intensidad de la meteorización y tasa de meteorización.

La intensidad o grado de meteorización, es la cantidad de alteración actual, con respecto a un estado inicial, identificado en la roca sólida o sedimento. Estos cambios son el resultado de varios procesos de descomposición, en otras palabras, cuánto se ha transformado un material de partida (mineral, roca, sedimento) con respecto a su estado inicial, por efecto de la meteorización y en particular, por efecto de los procesos químicos que causan descomposición. Según Bland y Rolls (1998) la intensidad de la meteorización se refiere a la extensión con la cual el regolito se aproxima a un estado de equilibrio.

Por otro lado, la tasa de meteorización se refiere, idealmente, a la cantidad de cambio por unidad de tiempo. Aunque en la práctica ésta se refiere a cambio de manera generalizada, el cálculo de la tasa requiere de un conocimiento del período de tiempo durante el cual ocurre la meteorización. Para Bland y Rolls (1998) la tasa de meteorización puede ser definida como el deterioro (cambio) de un material terrestre durante un tiempo específico. La principal dificultad en la determinación de la tasa de meteorización a partir de evidencia de cambio, es lograr un valor numérico preciso y absoluto que refleje la historia de la meteorización. Hay dos formas principales de estimar la tasa de alteración:

- Métodos de laboratorio que requieren mucha simplificación de la complejidad de campo.
- Estudio de los materiales alterados en el campo mediante el agua que drena de los mismos.

En términos generales y considerando todos los planteamientos expuestos, la tasa de meteorización será alta cuando:

- Exista agua disponible, es decir, la posibilidad de renovación continua del agua al sistema. Ello estará determinado por las condiciones climáticas, en especial el balance entre la precipitación y la evapotranspiración. Para Ahnert (1996), la presencia de agua en estado líquido es un requisito esencial para que los procesos químicos tengan intensidad significativa, desde el punto de vista geomorfológico.
- El agua penetre dentro del material de partida, lo que está determinado por las propiedades intrínsecas de ese material, entre otros, las características de la superficie y del espacio poroso, que en el caso de regolitos, sedimentos y suelos, está determinado por el tamaño y organización de los componentes. Sin embargo, la penetración del agua va a depender también de la organización de los poros y densidad de fracturas a escala de afloramientos rocosos, y a nivel de abstracción mineral, está condicionado por fisuras, planos de clivaje y otras superficies de debilidad. Además de las características del material de partida, es necesario considerar el relieve, que controla la acción de la energía potencial gravitatoria y, por ende, la distribución del agua en superficie y el tiempo de interacción entre esa agua con el material de partida. Por último, no debe olvidarse la cobertura

vegetal con su efecto de interceptación y freno al escurrimiento.

- El agua no solamente debe penetrar dentro del material, debe circular a través de éste y retenerse. Ello está íntimamente relacionado con la distribución del tamaño de los poros. Por otro lado, debe interactuar con los componentes de ese material de partida, lo que depende de las propiedades físicas y químicas de esos componentes y se favorece con altas temperaturas que, como es ampliamente conocido, afecta la velocidad de las reacciones. Por último, el agua también debe salir del sistema, extrayendo, principalmente en solución (lavado o lixiviación), los componentes químicos elementales (Ca, Mg, K, Na, entre otros). Todo el planteamiento anterior está determinado por la hidrodinámica del material de partida, por el relieve y la cobertura vegetal, cuya interacción determina que exista confinamiento (Eh negativos y reducción) o, la exportación de componentes solubles (Eh positivo y oxidación), en otras palabras, el drenaje. Recuérdese el comportamiento general contrastante a la meteorización existente entre rocas ígneas y sedimentarias, donde en general, se espera que se meteoricen más rápidamente las rocas ígneas porque sus constituyentes minerales son menos estables. Sin embargo, Bland y Rolls (1998) señalan, que los suelos tienden a formarse más rápidamente sobre rocas sedimentarias y la razón está asociada a la estructura abierta que permite la rápida circulación del agua.
- Vigorosa actividad biológica aeróbica, que favorezca la producción de CO₂ y de ácidos orgánicos, quienes generan iones hidrógeno a la solución del suelo, haciéndola más efectiva desde el punto de vista químico y participan en muchos procesos de la meteorización. Esta actividad biológica está muy relacionada, a escala regional, con las condiciones climáticas (precipitación y temperatura) pero localmente está condicionada, entre otros, por el relieve y condiciones del suelo.

La tasa de meteorización puede expresarse mediante el espesor de roca que se ha convertido en regolito en un lapso de tiempo dado, y una alta intensidad de la meteorización puede ser alcanzada a pesar de que la tasa de meteorización sea de moderada a baja. Ello requeriría un tiempo muy prolongado de actuación de los procesos. Por otro lado, una tasa de meteorización elevada no necesariamente se expresa en un alto grado de transformación de los materiales de partida (intensidad), si el tiempo de actuación de los procesos es corto o aun actuando por períodos de tiempo prolongados, cuando la tasa de remoción de los materiales por los agentes de la denudación, sea tan alta que movilice rápidamente el material producido.

En general la tasa de meteorización y, por ende, la intensidad de la misma, disminuye con la profundidad. Ello debido, según Summerfield (1997), a la disminución en el movimiento del agua por efecto de la mayor compactación en profundidad y; por consiguiente, menor espacio poroso por donde pueda circular el agua. Esto, a su vez, trae como consecuencia una disminución en la remoción de los materiales solubles, es decir, el lavado o lixiviación, que además es, para algunos autores, responsable de los cambios mineralógicos que se dan en el manto de alteración con la profundidad. El menor movimiento del agua se ve acompañado por una disminución en las fluctuaciones de la temperatura y por ende, en las expansiones y contracciones de los materiales, lo que podría ocasionar menor intensidad de los procesos físicos. Ahnert (1996) plantea la idea de un espesor crítico del regolito, a partir del cual gran parte del agua y los materiales disueltos se utilizan

en la transformación del mismo y no está disponible para que la meteorización de la roca in situ continúe.

Es importante destacar que algunos autores, entre ellos Cooke y Doornkamp (1990), señalan que la contaminación atmosférica acelera la meteorización. En este marco de ideas, consideran una tasa de meteorización normal y una tasa de meteorización acelerada. Esta última se produce cuando en la atmósfera existen altas concentraciones de CO_2 , SO_x y NO_x . Esto, a juicio de los autores, acelera los procesos químicos de la meteorización entre ellos: hidrólisis y carbonatación. Estas afirmaciones tienen sus bases en el estudio del deterioro de los monumentos arquitectónicos en las grandes ciudades, en comparación con el grado de afectación de monumentos similares en áreas rurales muy cercanas a éstas.

La intensidad de la meteorización puede ser estimada de diversas maneras, algunas de ellas sofisticadas, mientras que otras, principalmente aquéllas utilizadas en el campo, están basadas en criterios muy simples y un número pequeño de categorías arbitrariamente definidas, con las cuales se describen los mantos de alteración en profundidad hasta la roca fresca. Bland y Rolls (1998) plantean que la intensidad de la meteorización en un material puede ser estimada por los siguientes métodos:

- Aproximación descriptiva verbal.
- Descripción basada en el uso de herramientas e instrumentos (martillo).
- Intensidad basada en índices químicos.

Los dos primeros métodos han sido desarrollados para analizar el grado de transformación de los materiales a un nivel de abstracción o actuación del fenómeno. Se trata de conocer la intensidad de la meteorización en las rocas y minerales bajo la concepción de que a medida que ésta avanza, la coherencia de los componentes de las rocas y de los minerales va disminuyendo y, por supuesto, su resistencia mecánica. El nivel máximo se alcanzaría cuando se pierde la estructura de la roca o mineral, es decir, la acción de la meteorización ha dejado de ser isovolumétrica, en otras palabras, el volumen de la roca se ha modificado a causa de la meteorización. Lo que sucede, es que se ha formado un nuevo cuerpo, el regolito, con diferente organización, mayor porosidad y menor densidad aparente, producto de la meteorización, y donde ésta sigue actuando durante su evolución. De manera tal que la intensidad de la meteorización, en este nuevo cuerpo, se evalúa con otros parámetros como por ejemplo: la profundidad del regolito, la mineralogía (minerales primarios presentes, minerales secundarios formados, entre otros) y la diferenciación vertical de la misma en el perfil de alteración.

La intensidad de la meteorización basada en índices químicos, puede ser aplicada a rocas y a mantos de alteración (regolito), sedimentos y suelos. Según Bland y Rolls (1998), la intensidad de la meteorización utilizando índices químicos puede ser evaluada en términos absolutos comparando la constitución del material de partida, con aquella del material meteorizado. Sin embargo en muchos casos, donde la composición del material parental no es conocida o es incierta, se evalúa esa intensidad en términos relativos, lo que de acuerdo con Elizalde (1999), supone que algunos componentes permanecen prácticamente inmóviles durante la meteorización y sirven como puntos de referencia. En

este sentido, pueden utilizarse dos aproximaciones, una mediante el cociente: minerales resistentes (turmalina, cuarzo, entre otros) y minerales susceptibles; y la otra, que asume, el aluminio permanece inmóvil durante la meteorización. Elizalde (1999) plantea que también pueden cumplir un papel similar al aluminio, otros elementos como Fe, Ti y Zr.

Con referencia a la primera aproximación, Rube (citado por Goudie *et al* 1981), propone dos relaciones, una para minerales pesados (WR (h)) y otra para minerales livianos (WR (l)):

WR (h) = Circón + Turmalina / Anfíboles + Piroxenos.

WR (l) = Cuarzo / Feldespatos.

En la segunda aproximación, y sin entrar a discutir en profundidad la base conceptual que le da origen; se han propuesto un conjunto de relaciones como se muestra en el cuadro I. La gran mayoría de ellas, utiliza las cantidades de los elementos en forma de óxidos, lo que se considera aceptable para efectuar los cálculos, pero que en algunos casos, como en el Na_2O , según Bland y Rolls (1998), tiene realmente poco valor práctico.

Cuadro I. Índices de meteorización

- Índice Químico de Meteorización $\text{CIW} = ((\text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})) * 100$
- Índice Químico de Alteración $\text{CIA} = ((\text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})) * 100$
- Índice de Meteorización $\text{WI} = ((2\text{Na}_2\text{O} / 0,35) + (\text{MgO} / 0,9) + (2\text{K}_2\text{O} / 0,25) + (\text{CaO} / 0,7)) * 100$
- Índice de Meteorización de Reiche (1943), modificado por Vogel (1975) $\text{MPI} = ((\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)) * 100$
- Relación de Vogt (Vogt, 1927; Roaldset, 1972) $\text{V} = (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O}) / (\text{MgO} + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$
- Relación Ruxton (Ruxton, 1968) $\text{R} = \text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$

Fuente: Chittleborough, Citado por Bland y Rolls (1998).

Existen otras determinaciones sofisticadas que no serán discutidas en este trabajo, que utilizan el microscopio electrónico de barrido. Las mismas se basan en el análisis de las superficies de los minerales pesados y la determinación de ciertos rasgos, que Bland y Rolls (1998) denominan microtextura, a partir de los cuales se puede determinar el grado

de meteorización.

Los enfoques de estudio de la meteorización

La intensidad y tasa de la meteorización se asocia principalmente a la naturaleza y competencia de los procesos químicos (meteorización química). Tradicionalmente, se expresan dos grandes aproximaciones complementarias en el estudio de la meteorización: la termodinámica, que analiza la forma mineral más estable, mediante los cambios de energía envueltos en las reacciones químicas; y la cinética centrada en la tasa y mecanismo de cambio.

El enfoque termodinámico de la meteorización

De acuerdo con Kittrick (1977), la termodinámica se refiere al estudio de las transacciones de energía, y es destacable que utilizando los conceptos básicos de esta ciencia, se haya profundizado en el estudio de los procesos químicos de la meteorización y en particular, tal y como lo plantea Elizalde (1999), en el análisis detallado de los actores involucrados en el proceso y la incidencia de cada uno en el producto final.

Para ilustrar estos planteamientos, se realizará una analogía mecánica, como lo es, una bola que se desplaza en un plano inclinado. Para ello se requiere expresar que todas las sustancias contienen energía dentro de su estructura química, en forma de alguna manera parecida a la bola de la figura 5, que en cada punto y en particular en los puntos **A** y **B**, posee energía potencial gravitatoria, proporcional a su altura sobre un plano de referencia. En este sentido, la energía potencial de la bola en el punto **A** será mgh_1 y en el punto **B**, mgh_2 . Obviamente la energía de la bola en el punto **A** será mayor a la energía de la bola en el punto **B**, y por supuesto, en forma espontánea, la bola tenderá a moverse de **A** hacia **B**.

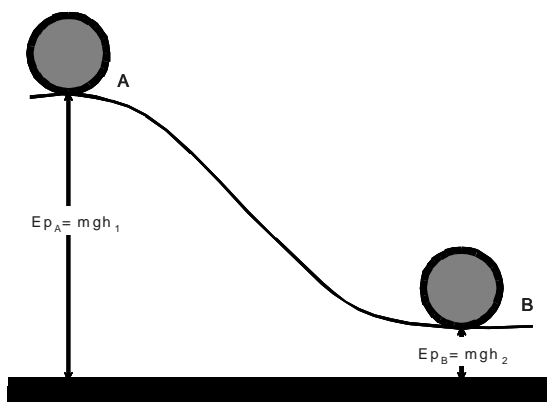


Figura 5.- El movimiento espontáneo de una bola a través de la pendiente en la dirección en que disminuye su energía potencial gravitatoria

Hillel (1980), señala que la tendencia espontánea de toda la materia en la naturaleza es a moverse de donde la energía potencial es mayor hacia donde es menor, es decir, en la dirección de disminución de la energía potencial. La tasa de disminución de la energía con la distancia es de hecho la fuerza que causa el movimiento.

Ahora, cuando ocurren reacciones químicas también se libera energía, en forma de calor, similar a cuando la bola pierde energía potencial al moverse pendiente abajo. Este planteamiento es aplicable bajo la premisa de que la mayoría de los procesos químicos de la meteorización son de descomposición y por ello exotérmicos, aunque no debe olvidarse que algunas reacciones químicas (procesos químicos) de síntesis absorben calor (reacciones endotérmicas).

El calor desprendido en una reacción representa una liberación neta de energía libre, conocida técnicamente como energía libre de Gibbs. Si una reacción química particular tiene probabilidad de ocurrencia, ello está determinado por el cambio de energía libre envuelto, y dicho cambio puede ser calculado restando la suma de las energías libres de los reactivos a la suma de las energías libres de los productos. En nuestra analogía mecánica, sería restando a la energía potencial en el punto B la energía potencial en el punto A, es decir, $mgh_2 - mgh_1$. En otras palabras, para cada reacción de meteorización, los cambios de la energía libre, serán iguales a la suma de los cambios de la energía libre de formación de los productos menos la suma de los cambios de la energía libre de formación de los reactivos. En forma matemática sería:

$$G(\text{reacción}) = \text{Suma } G(\text{formación}) \text{ productos} - \text{Suma } G(\text{formación}) \text{ reactivos}$$

Si se cuenta con la energía libre de Gibbs para la formación de varias especies químicas a 25 °C y a la presión de 1 atm, será posible calcular la energía libre de formación para la reacción. Ver Elizalde (1999) para varios valores estimados. Si el cambio de energía es negativo, ello indicaría que la reacción ocurrirá espontáneamente; mientras más negativo, más estables serán los productos de la reacción. Ello implica, que con dos minerales diferentes, ejemplo, anortita y albita, en el mismo ambiente de meteorización será posible analizar su transformación a motmorillonita, conociendo los valores para G de la reacción:

Anortita (feldespato cálcico) a motmorillonita; $G(\text{reacción}) = - 88,6 \text{ kcal/mol}$

Albita (feldespato sódico) a motmorillonita; $G(\text{reacción}) = - 21,82 \text{ kcal/mol}$

Se puede concluir entonces que si las condiciones del medio (lixiviación y pH) lo favorecen. El primer mineral en comenzar a descomponerse será la anortita y luego comenzará a transformarse la albita.

De acuerdo a Kittrick (1977) la relación entre los cambios de energía libre de la reacción (G) con la temperatura (T) la constante de los gases (R) y el logaritmo de la constante de equilibrio ($\ln(Ke)$), se expresa de la siguiente forma:

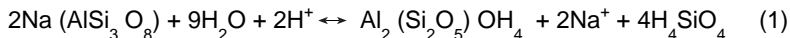
$$G(\text{reacción}) = -RT \ln(Ke)$$

A 25 °C, esta ecuación puede simplificarse en: $G(\text{reacción}) / - 1,364$

En pocas palabras, se puede calcular en forma general el valor del Log Ke, a partir de parámetros termodinámicos de estado de los componentes del sistema y, por

ende, la constante de equilibrio de la reacción (K_e). Ello permite, según Elizalde (1999), establecer la alterabilidad relativa entre diferentes minerales, considerando el efecto que tendrán parámetros químicos, estructurales y ambientales.

Para expresar mejor los planteamientos anteriores, debemos recordar que la hidrólisis ácida es uno de los procesos químicos más importantes en la meteorización, de manera que la mayoría de las reacciones que se suceden en el material de partida, pueden expresarse de forma similar a la meteorización de la albita (feldespato sódico) a caolinita, tal y como se describe a continuación:



Esta ecuación, de acuerdo con Elizalde (1999), puede analizarse como ecuación de equilibrio. Esto implica que la reacción no evolucionará en ninguno de los sentidos, ni hacia los productos, ni hacia los reactivos, cuando las actividades de los productos en solución (iones) se encuentren en ciertas proporciones respecto a las actividades de los reactivos.

La relación de concentración de reactivos y productos para la ecuación (1) puede ser escrita de acuerdo a la ley de acción de masas de la siguiente manera:

$$K_e = (\text{Na}^+)^2 + (\text{H}_4\text{SiO}_4)^4 / (\text{H}^+)^2 \quad (2)$$

Debe recordarse que cuando los sólidos participan en una reacción, su concentración se considera igual a 1, por ello la concentración de albita y de caolinita no aparecen en la ecuación (2), es decir, en la expresión para la constante de equilibrio. Planteamiento válido también para el caso del agua aunque la explicación sea diferente. La ecuación (2) puede expresarse de forma logarítmica de manera que la expresión puede transformarse en:

$$\log K_e = 2 \log (\text{Na}^+) + 4 \log (\text{H}_4\text{SiO}_4) - 2 \log (\text{H}^+) \quad (3)$$

El análisis de la constante de equilibrio permite conocer si los procesos químicos pueden o no producirse, de acuerdo con las condiciones del ambiente de meteorización, en particular, de la presencia o ausencia de ciertos cationes que pueden actuar como limitantes del proceso cuando su actividad sobrepasa ciertas cantidades. En otras palabras, si conocemos la constante de equilibrio para la reacción de albita a caolinita (K_e), en forma experimental, algo totalmente factible, se puede calcular en un ambiente de meteorización determinado, la actividad química del sodio (Na^+), del ácido silícico (H_4SiO_4) y del hidrógeno (H^+). Estos valores se sustituyen en la ecuación (2), y se obtendrá un valor K_1 , que si es menor que K_e , implicaría que la reacción se desplaza hacia los productos y se favorece la formación de caolinita. Pero si K_1 es mayor que K_e , entonces ocurre lo contrario y la formación de la caolinita no se ve favorecida.

Con el planteamiento anterior y solamente observando la ecuación (2), se puede señalar que como la actividad del ion hidrógeno (H^+) incrementa, o en otras palabras, el medio se hace más ácido; por su posición en el denominador de la ecuación, el valor de

K₁ tenderá a ser menor que **K_e** y por ello se favorecerá la formación de la caolinita. Lo contrario sucedería si el pH aumenta, es decir, que el medio tienda a ser menos ácido.

Un análisis similar puede efectuarse con la actividad del sodio (Na⁺), pero este término en la ecuación (2) se encuentra en el numerador, de manera que cuando la actividad de este elemento disminuye, lo que en la práctica ocurre cuando es extraído y removido del sistema (lixiviación), se favorecerá la formación de caolinita. Este análisis es el que soporta afirmaciones, como la de Summerfield (1997), en el sentido de que la termodinámica puede indicar cuáles especies minerales están en mayor o menor equilibrio con las condiciones prevalecientes en el ambiente de meteorización.

Bland y Rolls (1998), señalan que la termodinámica indica la probabilidad de que ocurra una reacción, sin embargo, sus resultados deben ser interpretados cuidadosamente. Por ejemplo, existen casos donde la información termodinámica no favorece la reacción, pero las observaciones de campo y experimentales indican que esta ocurre, así mismo, existen reacciones favorables desde el punto de vista termodinámico, pero tan lentas, que de manera efectiva en la realidad la reacción no ocurre. Por ello los datos termodinámicos deben complementarse con información sobre la tasa y mecanismo de cambio, o sea, la cinética de las reacciones.

El enfoque cinético de la meteorización.

Como se explicó anteriormente, la termodinámica indica si un proceso químico es posible y bajo qué condiciones. Sin embargo no se conoce si tomará un minuto, una hora o un siglo y cuáles son los factores que alteran su velocidad. De esto se encarga, según Bohn *et al.* (1993) y Marcano (1992), la cinética química, la cual estudia cuantitativamente la velocidad de las reacciones químicas y los factores que la afectan.

La velocidad de muchas de las reacciones de meteorización, no se conoce con la misma profundidad que gran parte de los aspectos termodinámicos. Es necesario indicar que algunos procesos tan simples como la disolución de la calcita, se ha demostrado son altamente complicados, de manera que el caso del enfoque cinético de la meteorización, por la necesidad de ampliar otros conceptos, escapa al alcance de este artículo. No obstante, se expresaran algunas ideas muy generales. Por ejemplo, de acuerdo con Marcano (1992), si se desea calcular la velocidad con la cual varía una propiedad (*x*), se debería medir esa propiedad en tiempos diferentes y luego calcular sus variaciones

x en lapsos (*t*) de manera que la velocidad quedaría definida entonces como:

$$V = \frac{x}{t} \quad (4)$$

Utilizando nuevamente una analogía mecánica y esta vez en el marco de las ideas de Marcano (1992), si se requiere calcular la velocidad de un automóvil que se desplaza en una carretera, en una primera aproximación, se podría medir la distancia total recorrida y dividirla entre tiempo transcurrido. Sin embargo, de esta manera se conocerá la velocidad promedio, pero sin tener información del modo como transcurre el recorrido, es decir, cuáles fueron las partes más rápidas y cuáles más lentas. Por ello si se desea mayor información, la distancia entre medidas debería ser pequeña. De manera tal que la velocidad en un instante (*t*), estaría dada por:

$$V = \frac{d(x)}{d(t)} \quad (5)$$

Esta variación instantánea de la posición respecto al tiempo sería simplemente la derivada de x respecto a t. Ahora en este trabajo no hay interés en la velocidad de desplazamiento de los vehículos por las carreteras del estado o del país, simplemente se desea conocer la velocidad con que ocurre una reacción química. Esto conduce a conocer por supuesto qué se entiende como tal y en este sentido Marcano (1992), la define como la rapidez con la cual disminuye la concentración de los reactantes o incrementa la de los productos. Ello evidencia entonces, dos estrategias para estimar la velocidad de una reacción, es decir, midiendo la disminución de los reactantes o midiendo el aumento en la concentración de los productos en el tiempo.

La velocidad de reacción frecuentemente depende de la concentración de las especies reactantes y esta dependencia, según Marcano (1992), puede expresarse como:

$$V = k (A)^\alpha + (B)^\beta + (C)^\sigma \dots\dots\dots (6)$$

Esta expresión se denomina ley de velocidad y en ella los exponentes α , β , σ , pueden ser números enteros o fraccionarios. La ecuación (6) descrita es de orden respecto a reactivo A, orden respecto a B y así sucesivamente. La suma de todos los exponentes es el denominado orden de reacción, el cual no coincide con el coeficiente estequiométrico de cada reactante.

Por otro lado, en las expresiones de velocidad de cada una de las reacciones aparece la constante k en el lado que contiene las concentraciones. Esta proporcionalidad entre la velocidad y las concentraciones es llamada constante de velocidad y es una función de la temperatura. Con base a los planteamientos anteriores si se considera un sistema del tipo:



La velocidad de la reacción puede ser medida mediante la disminución de la concentración químicamente efectiva de A, es decir:

$$- \frac{d(A)}{d(t)} = k(A) \quad (8)$$

Donde (A) es la concentración del reactivo A en un tiempo t, y k es la constante de velocidad. Por otro lado se podría tener un sistema del siguiente tipo:



La velocidad de la reacción se expresaría como: $-d(A)/d(t) = k(A)^2$ (9)

La ecuación (8) representa una de reacción de primer orden, en otras palabras, la velocidad de la reacción depende de la concentración de un reactivo en este caso A y

la ecuación (9), una reacción de segundo orden, porque la concentración depende de dos reactivos, o como en el caso particular del ejemplo, de un reactivo al cuadrado (A).

De acuerdo con Bohn et al. (1993), las reacciones de primer orden son frecuentes, mientras que las de orden cero no son comunes, sin embargo, la descomposición de la motmorillonita es proporcional a la concentración de H^+ de la solución. De allí que, según Bohn et al. (1993), esta reacción es independiente de la cantidad de montmorillonita, en cuyo caso, según los autores, tendría una reacción de orden pseudo cero. En otras palabras, la velocidad depende únicamente de la concentración de H^+ .

La descomposición de la caolinita depende de la acidez de la solución y de su concentración. De acuerdo con Bohn et al. (1993) a medida que la caolinita se descompone la velocidad de esa descomposición disminuye. Por ello su descomposición completa, en teoría, requeriría un tiempo infinito. Se conoce ampliamente que la caolinita es resistente a la meteorización.

Conclusiones

El enfoque que cada rama del conocimiento le da a fenómenos como la meteorización, es parte de las dificultades que se generan al desarrollar este contenido temático en las asignaturas que componen el Área de Ciencias de la Tierra en la Carrera Educación Mención Geografía y Ciencias de la Tierra. La unidad académica debe realizar, por lo tanto, todos los esfuerzos para la articulación necesaria de los contenidos de las diversas asignaturas. Este trabajo es un pequeño aporte en esa dirección.

La meteorización es compleja y en la literatura en español existen dos términos adicionales para referirse al mismo fenómeno natural. Se ha tratado de explicar y discutir los elementos básicos que debería incluir una definición de meteorización, con el objeto de suministrar herramientas para construir mediante la combinación de esos elementos una definición propia y aceptable de lo que se entiende como tal. Por fortuna en Ciencias de la Tierra, no todas las definiciones son tan complejas y esquivas como esta.

A pesar del volumen de información producida sobre este importante fenómeno natural, el conocimiento del sistema factor–proceso–producto, todavía es incompleto. Ello se evidencia en el hecho de que en la bibliografía consultada no existe precisión sobre qué se entiende por factor de la meteorización y tampoco existe consenso sobre cuáles son esos factores de la meteorización. Un planteamiento similar es válido para los procesos, donde además, persisten todavía algunas diferencias en adoptar los procesos biológicos y, por ende, la meteorización biológica como una categoría separada.

La meteorización afecta a varios cuerpos naturales y su actuación puede ser analizada a niveles de abstracción diferentes. Ello es una característica que debe tenerse en cuenta para el análisis de los productos de la misma y evita confusión entre los educandos.

El estudio de la meteorización mediante aproximaciones termodinámicas y cinéticas en forma integrada, sigue siendo una alternativa importante para conocer el efecto que tienen parámetros químicos, estructurales y ambientales en la meteorización de los

diferentes materiales de partida.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico (CDCHT) de la Universidad de Los Andes por el financiamiento de la presente investigación, Proyecto Código NUTA-C-014-99-01C.

Referencias

- ADAMS, M. (1995). Fundamentos de química de suelos. Caracas: Ediciones Anauro. Universidad Central de Venezuela. CDCHT. 390 pp.
- AHNERT, F. (1996). Introduction to geomorphology. London:Arnold. 417 pp.
- BLAND, W. y ROLLS, D. (1998). Weathering an introduction of the scientific principles. London: Arnold. 271 pp.
- BOHN, H. L., McNEAL, B.L. y O'CONNORS, G. A. (1993). Química del suelo. México: Limusa. 370 pp.
- BUOL, S.W., HOLE, F.D. y Mc CRAKEN, R. J. (1981). Génesis y clasificación de suelos. México: Editorial Trillas. 417 pp.
- COOKE, R.U. y DOORNKAMP, J. C. (1990). Geomorphology in environmental management. Oxford, UK: Clarendon Press. 410 pp.
- CASANOVA, E. (1996). Introducción a la ciencia del suelo. Caracas: Universidad Central de Venezuela. CDCHT. 379 pp.
- ELIZALDE, G. (1983). Ensayo de clasificación sistemática de categorías de paisajes. Primera aproximación. Instituto de Edafología. Maracay, Venezuela: Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. 46 pp.
- ELIZALDE, G. (1999). Alteración de minerales. Guía de estudio. Maracay, Venezuela: Universidad Central de Venezuela. Postgrado en ciencia del suelo.
- ELIZALDE, G. y JAIMES, E. (1989). "Propuesta de un modelo pedogeomorfológico". Revista Geográfica Venezolana, Vol. XXX, pp. 5 – 35.
- ELIZALDE, G., VILORIA, J. y JACOME, A. (2000). Elementos de agrología. Documento electrónico. Maracay, Venezuela: Universidad Central de Venezuela. 150pp.
- FASSBENDERG, H. (1980). Química de suelos. San José, Costa Rica: IICA.. 398 pp.
- GOUDIE, A., MALCOM, A., BURT, T., LEWIN, J. y RICHARD, K. (1981). Geomorphologic techniques. UK: British Geomorphologic. Research Group. 395 pp.
- GOUDIE, A., ATKINSON, B. W., GREGORY, K. G., SIMMONS, I.G., STUDDART, D. R., y SUGDEN, D. (1994). The encyclopedic dictionary of physical. Oxford. UK: Blackwell publishers. 611 pp.
- HILLEL, D. (1980). Fundamentals of soil physics. New York: Academic Press. 411pp.
- KITTRICK, J. (1977). "Mineral equilibria and the soil system". En Minerals in Soil Environments. Madison. Wisconsin. USA: Soil Science Society of America. P 1-25.
- LEET, L. D. y JUDSON, S. (1998). Fundamentos de geología física. México, DF.: Editorial Limusa, SA. 455 pp.
- LÓPEZ, F., RUBIO, J. y CUADRAT, J. (1992). Geografía física. Madrid: Ediciones Cátedra, S.A 594 pp.
- LOUGHAM, F.C. (1969). Chemical weathering of silicate minerals. New York: Elsevier. 154 pp.
- MALAGÓN, D. (1979). Fundamentos de mineralogía de suelos. Tomo I. Mérida – Venezuela.: CIDIAT. 484 pp.
- MARCANO, D. (1992). Energía, entropía y dinámica química. Caracas: Editorial Miró C.A. 207pp.
- MUÑOZ, J. (1995). Geomorfología general. Madrid: Editorial Síntesis. 351 pp.
- PEDRO, G. (1961). "An experimental study on the geochemical weathering of crystalline rocks by water". Clay Minerals Bull. 4, 226-281.
- PORTA, J., LÓPEZ ACEVEDO, M. y ROQUERO, C. (1994). Edafología para la agricultura. Madrid: Ediciones Mundi – Prensa. 806 pp.
- RIECHE, P. (1950). A survey of weathering processes and products. USA: Univ. New México publ.

In Geology. 3 ed.

RONDON DE R, C. y ELIZALDE, G. (1997). "Procesos pedogenéticos en un modelo de sistema suelo, formado por nueve subsistemas". *Venesuelos* 2 (1): 32 – 36.

SUMMERFIELD, M. (1997). *Global geomorphology*. UK: Group Ltd. 536 pp.