

Intemperismo: tipos e fatores que controlam o intemperismo; principais reações; processos de alteração de rochas e minerais; produtos formados e índices de intemperismo.

1. Introdução

Intemperismo é o conjunto de processos físicos, químicos e biológicos que promovem a quebra física e a alteração química das rochas próximas, ou, na superfície da crosta terrestre. Por meio de uma complexa interação de processos, o fenômeno transforma as rochas e seus minerais em produtos em equilíbrio mais estável para as condições físico-químicas prevalentes no ambiente.

O termo intemperismo deriva do latim *intemperie*, que significa os rigores das variações das condições atmosféricas (temperatura, chuva, vento e umidade). O intemperismo, processo geológico exógeno, é o primeiro passo para inúmeros outros processos geológicos, geomorfológicos e biogeoquímicos e é especialmente importante em dois outros processos de dinâmica externa do globo: a formação de rochas sedimentares e a gênese de solos.

Em termos da gênese de solos, o intemperismo é o responsável pela decomposição e desagregação das rochas, transformando-as de materiais compactos em materiais desagregados, sobre os quais atuarão os fatores e processos de formação de solos. Assim, o intemperismo pode ser visto como um processo intermediário em transformações do tipo rocha-sedimento-rocha, na formação das rochas sedimentares, ou rocha-saprolito-solo, na gênese e desenvolvimento dos solos.

O intemperismo relaciona-se diretamente com diversas características dos saprolitos e dos solos formados na superfície da crosta, conforme a sua intensidade de atuação e a natureza das rochas e dos minerais envolvidos. Com isto, ele é um processo que pode, parcialmente, desde controlar a fertilidade natural dos solos, pelo suprimento de nutrientes, até atuar como agente tamponante, contra diversos problemas ambientais preocupantes nos dias de hoje, como: (i) impacto da chuva ácida em solos; (ii) relação entre níveis de CO₂ na atmosfera; (iii) interação de metais pesados e contaminantes orgânicos com produtos do intemperismo.

Usualmente, são reconhecidos três tipos de intemperismo: físico, químico e biológico. A atuação conjunta destas três formas de intemperismo faz com que seja difícil separá-los e

individualizar os seus efeitos completamente. Assim, esta divisão entre esses tipos tem um cunho mais didático, servindo para simplificar o seu estudo, como será apresentado a seguir.

2. Intemperismo físico

O intemperismo físico é aquele que faz com que a rocha original desintegre-se em tamanhos menores, sem que haja mudança apreciável em sua composição química ou mineralógica. Teoricamente, uma rocha pode ser subdividida em tamanhos menores, passando por matacões, calhaus, cascalhos, do que se tem um conjunto de minerais primários, e atingir o tamanho das frações areia e silte, do que se têm minerais primários, individualizados apenas por processos de quebra física. O intemperismo físico pode ser subdividido em termal e mecânico e caracteriza-se por englobar todos os processos que promovem os esforços suficientes para quebrar as rochas.

2.1. Intemperismo físico termal

O intemperismo físico termal é aquele que se caracteriza pelas flutuações diurnas e noturnas de temperatura, que provocam a fratura superficial ou a desintegração dos grãos das rochas. Em tese, cada vez que a temperatura eleva-se, os minerais componentes das rochas expandem-se, para, em seguida, contraírem-se, em virtude da diminuição da temperatura. Como diferentes minerais têm diferentes coeficientes de dilatação volumétrica, eles expandem e contraem sob diferentes taxas, o que faz com que, com o tempo, os esforços produzidos sejam suficientes para enfraquecer as ligações entre os minerais e, eventualmente, provocar a ruptura da rocha.

Características das rochas que influem neste tipo de intemperismo são a composição mineral, a textura e a cor. A composição mineral influi, fazendo com que rochas que têm maior número de minerais sejam mais susceptíveis a este intemperismo. Uma rocha ígnea com diversos minerais primários, como quartzo, feldspato e micas, por exemplo, sofrerá muito maior influência do intemperismo físico termal, comparada com um argilito, no qual os processos de expansão e contração atuarão basicamente apenas sobre um tipo de mineral, essencialmente em bloco, não causando rupturas.

A textura é outro fator importante, pois minerais maiores se expandem e se contraem com mais intensidade e, com isto, rochas mais grosseiras têm maior possibilidade de

desintegração. O granito, rocha fanerítica, será mais facilmente atacado pelo intemperismo físico-termal que seu correspondente afanítico, riolito.

A cor é também característica que influi na atuação do intemperismo termal, observando-se que rochas mais escuras sofrem mais este tipo de intemperismo, comparadas com rochas claras. A radiação solar que atinge uma rocha escura é totalmente absorvida e transformada em calor, ao passo que a mesma radiação, atingindo uma rocha clara, tem boa parte refletida, não produzindo energia calorífica. Assim, rochas melanocráticas, ou seja, as rochas máficas, em geral, são mais intensamente atacadas que as rochas leucocráticas ou félsicas.

2.2.Intemperismo físico mecânico

Este é um tipo de intemperismo no qual são considerados quaisquer esforços mecânicos que levam à fragmentação da rocha. Exemplos importantes destas forças mecânicas são:

- Exposição superficial da rocha: os blocos de rochas, quando estão ainda debaixo da superfície da crosta terrestre, onde foram formados, estão sujeitos a grandes pressões confinantes, que são liberadas quando estas rochas são expostas à superfície pela erosão. A liberação da pressão na parte superficial do bloco de rochas leva à sua ruptura, caracterizando-se um intemperismo físico mecânico importante, principalmente nos locais onde as temperaturas não permitem o congelamento/fusão da água.
- Congelamento/fusão da água: a água, ao se congelar, pode gerar pressão suficiente para desintegrar a maioria das rochas. Com o congelamento, ela aumenta de volume da ordem de 9 %, ao passar da forma líquida para a sólida (gelo). Assim, onde exista umidade suficiente para que a água penetre em frestas e poros das rochas e a temperatura diminua o suficiente para seu congelamento, as pressões internas criadas são grandes o suficiente para fragmentar a rocha. Este processo pode ser mais eficiente em ambientes onde a temperatura flutue em torno de 0 °C várias vezes ao ano.
- Cristalização de sais: soluções salinas podem penetrar em fendas e poros em rochas e, a partir daí, fragmentá-la por diferentes maneiras. A primeira e mais comum é a

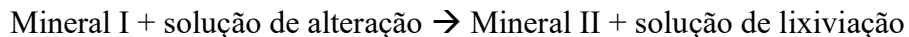
cristalização do sal dissolvido nesta solução, com o conseqüente aumento da pressão interna e posterior quebra da rocha. Outra maneira é a expansão térmica dos sais que tenham coeficientes de expansão maiores que aqueles das rochas mais comuns. Algumas vezes, a própria hidratação de sais cristalizados pode provocar expansão e causar quebras e rupturas nas rochas.

3. Intemperismo químico

O intemperismo químico é aquele no qual a composição química e, ou, mineralógica da rocha original sofre mudanças marcantes. Ele é caracterizado por uma transformação química dos minerais primários, oriundos da rocha original, para minerais secundários, formados pelo intemperismo. Esta transformação química realiza-se por meio da ação individualizada ou conjunta dos agentes do intemperismo, por meio de uma série de reações químicas inerentes ao processo.

O principal agente do intemperismo químico é a água da chuva, que infiltra e percola as rochas. Essa água, rica em O₂, em interação com o CO₂ da atmosfera, adquire caráter ácido. Em contato com o solo, onde a respiração das plantas pelas raízes e oxidação da matéria orgânica enriquecem o ambiente em CO₂, tem seu pH ainda mais diminuído.

No intemperismo químico, aos constituintes mais solúveis das rochas intemperizadas que são transportados pelas águas que drenam o perfil de alteração, chamamos de fase solúvel. Em conseqüência, o material que resta no perfil de alteração, chamamos de fase residual, que torna-se progressivamente enriquecido dos constituintes menos solúveis. De modo que as reações que ocorrem no intemperismo químico podem ser representadas pela seguinte equação genérica:

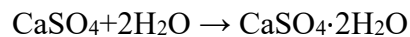


Na maior parte dos ambientes da superfície da Terra, as águas percolantes tem pH entre 5 e 9. Nesses ambientes, as principais reações do intemperismo químico são a hidratação, a dissolução, a hidrólise e a oxidação. Em alguns ambientes, o pH das águas pode ser inferior a 5 e, nesse caso, ao invés da hidrólise, a reação predominante é a acidólise, associada a casos mais específicos do intemperismo biológico.

3.1.Principais reações do intemperismo químico

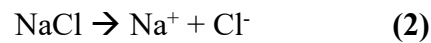
3.1.1. Hidratação

A hidratação dos minerais ocorre pela atração entre os dipolos das moléculas de água e as cargas elétricas não neutralizadas da superfície dos grãos. Na hidratação, moléculas de água entram na estrutura mineral, modificando-a e formando, portanto, um novo mineral. Como exemplo, pode-se citar a transformação da anidrita em gipsita, segundo a reação:



3.1.2. Dissolução

Alguns minerais estão sujeitos à dissolução, que consiste na solubilização completa. É o caso, por exemplo, da calcita e da halita, conforme as reações:



A dissolução intensa das rochas, que ocorre mais em terrenos calcários, pode levar a formação de relevos cársticos, caracterizados pela presença de cavernas e dolinas.

3.1.3. Hidrólise

Na hidrólise, o íon H^{+} , resultado da ionização da água, entra nas estruturas dos minerais, deslocando (removendo/retirando) principalmente cátions alcalinos (K^{+} e Na^{+}) e alcalinos-terrosos (Ca^{+} e Mg^{+}), que são liberados para a solução. A estrutura do mineral na interface sólido/solução de alteração acaba sendo rompida, liberando Si e Al (átomos isolados: monômeros; em grupos: polímeros) na solução. Esses elementos, podem então, se recombinar resultando na neoformação de minerais secundários.

A hidrólise ocorre sempre na faixa de pH de 5 a 9. Se há, no meio, condições de renovação das soluções reagentes, estas mantêm-se diluídas, e as reações podem prosseguir, eliminando os componentes solúveis. O grau de eliminação dos elementos/substâncias dissolvidos define a intensidade da hidrólise. Por exemplo, no caso dos feldspatos potássicos, podem distinguir a hidrólise total e a hidrólise parcial.

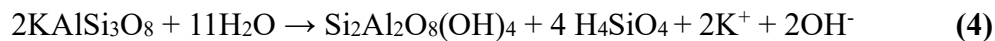
Na hidrólise total, 100% da sílica e do potássio são eliminados. A sílica, apesar de pouco solúvel na faixa de pH da hidrólise, pode ser totalmente eliminada caso as soluções de alteração sejam constantemente diluídas, o que acontece em condições de pluviosidade alta e drenagem eficiente dos perfis. O resíduo da hidrólise total do feldspato-K é o hidróxido de alumínio (gibbsita), insolúvel na faixa de pH da hidrólise.



Na hidrólise parcial, em função das condições de drenagem menos eficientes, parte da sílica permanece no perfil, já o potássio pode ser total ou parcialmente eliminado. Esses elementos reagem com o alumínio, formando aluminossilicatos hidratados (argilominerais).

Em função do grau de eliminação potássio, existem duas situações possíveis: quando 100% do potássio é eliminado em solução e quando parte do potássio não é eliminada em solução.

Na formação da caulinita (argilomineral 1:1), o feldspato-K sofre hidrólise parcial, com 100% do potássio eliminado em solução, 66% da sílica e permanência de todo alumínio.



Na formação da esmectita (argilomineral 2:1), o feldspato-K sofre hidrólise parcial, onde parte do potássio não é eliminado em solução. Nesse caso, há eliminação de 87% do potássio, 46% da sílica e permanência de todo alumínio.

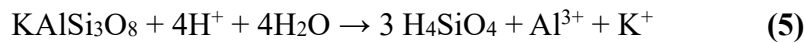
Na hidrólise total, além do alumínio, também o ferro permanece no perfil (quando existir), já que esses dois elementos têm comportamento geoquímico semelhante no domínio hidrolítico. Aos processos de eliminação total da sílica, formando oxi-hidróxidos de alumínio e ferro, dá-se o nome de alitização e ferralitização, respectivamente. Tais processos, serão discutidos posteriormente.

3.1.4. Acidólise

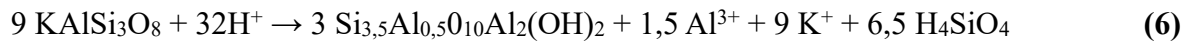
Na maioria dos ambientes da superfície continental, os processos intempéricos são de natureza hidrolítica, ou seja, são conduzidos por reações de hidrólise; entretanto em

ambientes frios, onde a decomposição da matéria orgânica não é total, formam-se ácidos orgânicos que diminuem bastante o pH das águas, sendo capazes de complexar o Fe e o Al, colocando-os em solução. Nesses domínios, de $\text{pH} < 5$, não ocorre hidrólise, sendo a acidólise o processo dominante de decomposição dos minerais primários.

Assim como no caso da hidrólise, também tem-se condições de acidólise total e parcial. Quando soluções de ataque tem $\text{pH} < 3$, no caso dos feldspato-K, ocorre a acidólise total, fazendo com que todos os elementos entrem em solução.



A acidólise parcial ocorre quando as soluções de ataque apresentam pH entre 3 e 5, nesse caso, a remoção do alumínio é apenas parcial, levando a individualização de esmectitas aluminosas.



3.1.5. Oxidação

Alguns elementos podem estar presentes nos minerais em mais de um estado de oxidação, como por exemplo, o ferro, que se encontra nos minerais ferromagnesianos primários como a biotita, anfíbolios, piroxênios e a olivinas, sob a forma de ferro ferroso (Fe^{2+}), que, quando liberado em solução, oxida-se a ferro férrico (Fe^{3+}), e precipita-se como um novo mineral, a goethita, que é um oxido de ferro hidratado (Figura 1). A goethita, por sua vez, pode transformar-se em hematita (Fe_3O_3) por desidratação.

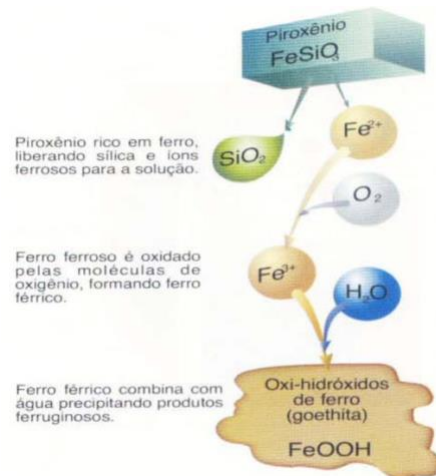


Figura 1. A alteração intempérica de um mineral com Fe^{2+} , resulta em oxidação do Fe^{2+} para Fe^{3+} , na formação de um oxi-hidróxido, a goethita.

De modo geral, quando o Fe é oxidado, são formados oxi-hidróxidos de ferro. Esses minerais conferem às coberturas intempéricas tons de castanho, vermelho, laranja e amarelo, comuns nos solos das zonas tropicais.

4. Intemperismo biológico

O intemperismo biológico é aquele em que os organismos vivos, que podem variar desde bactérias e fungos até plantas superiores e animais. As ações de quebra ou de alteração de minerais e rochas pelos organismos podem ser físicas ou químicas, mas, como elas são provenientes da ação dos organismos, pode-se diferenciar adicionalmente mais este tipo de intemperismo.

As ações físicas de quebra de minerais e rochas são de natureza mecânica e podem ser ativadas pelo simples fracionamento de partículas, por pequenos animais, ou pelo crescimento e penetração de raízes em fendas de solos e rochas, provocando sua ruptura.

As ações químicas de alteração de minerais e rochas são variadas. A respiração dos organismos produz CO_2 , que se dissolve na água, diminuindo seu pH. A absorção de nutrientes básicos, na forma de metais alcalinos e alcalino-terrosos, com conseqüente extrusão de prótons, também provoca diminuição do pH. Todas estas são ações que aumentam a concentração de H^+ no meio, intensificando a atuação da hidrólise, que é uma das principais reações do intemperismo químico.

Importante ação biológica dá-se pelo fenômeno da quelatação, responsável por considerável intemperismo de minerais e rochas. Quelatação é um processo biológico no qual os organismos produzem substâncias conhecidas como quelatos, que têm a habilidade de aprisionar cátions metálicos por uma ou mais de suas ligações químicas. Esta capacidade de agarrar os cátions metálicos faz com que eles possam ser mais facilmente removidos da estrutura cristalina, tornando os minerais e rochas mais fáceis de decompor. Dados da literatura mostram que os líquens excretam agentes quelantes e que estes são responsáveis por extensiva alteração das rochas em que eles estão instalados.

Outra forma importante de ação química provocada por organismos, caracterizando o intemperismo biológico, é a que acontece nas florestas de coníferas, principalmente de climas temperados e frios. Nesta situação, a liteira caracteriza-se por uma decomposição incompleta da matéria orgânica, produzindo quantidades grandes de ácidos orgânicos, que promoverão uma acidez elevada. Esta acidez solubiliza praticamente todos os minerais primários, deixando apenas aqueles muito resistentes ao intemperismo, principalmente, o quartzo, caracterizando uma reação de acidólise.

5. Processos de alteração de rochas e minerais

Os processos de alteração das rochas e minerais podem ser considerados como condições específicas dentro de cada tipo de reações acima apresentadas. Estes são distribuídos sobre a superfície terrestre em função de parâmetros climáticos atuais, distinguindo basicamente dois grandes domínios: regiões sem alteração química (14% da superfície global) e regiões com alteração química (86% da superfície global), sendo esta última onde ocorrem os processos químicos de alteração de rochas e minerais a depender da região climática em que se encontram.

A acidólise total (também considerada uma reação) cobre 16% da superfície global, ocorre em regiões frias do globo, onde os resíduos se degradam lentamente, formando ácidos orgânicos fortes que acabam por diminuir o pH do meio, acidificando-o. Em condições a solução de alteração apresenta $\text{pH} < 3$, todos os elementos entram em solução de lixiviação, como é mostrado na equação 5. Como resultado desse processo intempérico, tem-se a formação dos solos podzólicos, constituídos praticamente por minerais primários insolúveis, como o quartzo.

A alitização ou a ferralitização acontecem quando há remoção total da sílica e do potássio do perfil de alteração e recebem esse nome a depender da constituição em alumínio ou ferro do mineral primário, respectivamente. Estes processos ficam restritos a 13% da superfície continental, regiões do domínio tropical, onde as condições de precipitação abundante (> 1500 mm anuais) e drenagem eficiente dos perfis, permite a constante solubilização da solução de alteração, o que faz com que a sílica, apesar de pouco solúvel na faixa de pH da solução de alteração (entre 5 e 9), seja diluída para a solução de lixiviação, a exemplo do que acontece na hidrólise total do feldspato-K, formando a gibbsita (equação 3), no caso da alitização. Ambos os processos estão associados à formação de oxi-hidróxidos de Fe (Goethita) e de Al (Gibbsita).

No caso de hidrólise parcial, há formação de silicatos de alumínio, sendo o processo genericamente chamado de silitização, que a depender da quantidade de potássio perdido para solução de lixiviação, pode receber o nome de monossilitização ou bissilitização.

A monossilitização é o processo pelo qual 100% do K é removido em solução, como no caso da hidrólise parcial do feldspato-K formando a caulinita, um argilomineral do tipo 1:1 (Equação 4). Nesse caso, em específico, 100% do K e 66% da sílica são eliminados, restando todo o alumínio no perfil de alteração. Esse processo cobre 18% da superfície continental, em região de domínio tropical sub-úmido, com precipitação média > 500 mm e temperatura média anual $> 15^{\circ}\text{C}$. Além de argilominerais do tipo 1:1, como a caulinita, óxidos de ferro também podem ser formados por esse processo.

O processo de bissilitização é caracterizado pela não remoção de parte do em solução, restando parte deste no perfil de alteração (mineral neoformado). É o que acontece na hidrólise parcial do feldspato-K formando a esmectita, um argilomineral do tipo 2:1. Parte do potássio permanece no mineral neoformado ($\text{Si}_{13,7}\text{Al}_{0,3}\text{O}_{10}\text{Al}_2(\text{OH})_2\text{K}_{0,3}$), ao passo que parte é removido na solução de lixiviação (2K^+). Esse processo é responsável por cobrir maior parte da superfície continental (39%) e ocorre em zonas temperadas e áridas, com alteração e lixiviação pouco intensas.

6. Fatores que controlam o intemperismo

6.1. Material parental

O material parental, ou de origem que são as rochas é um fator importante que controla o intemperismo. Estas, têm sua alteração intempérica controlada em função dos seus minerais constituintes, sua textura e estrutura.

Uma rocha silicática, como o granito, é mais resistente à alteração que uma rocha carbonática, como o mármore. Isso se dá pelo fato de alguns minerais serem mais susceptíveis à alterações que outros. Isso pode ser observado, por exemplo, para os minerais silicáticos de origem magmática, na série de reações de Bowen (Bowen, 1928), que trata de um conjunto de reações que representa a ordem de cristalização dos minerais a partir do magma (Figura 2).

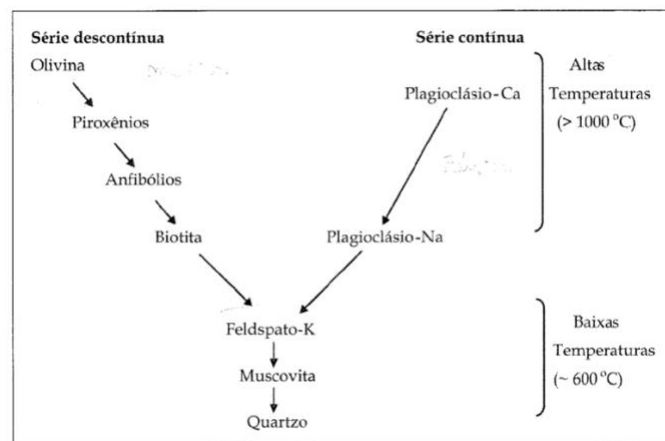


Figura 2. Ordem de cristalização dos principais minerais primários no magma: Série de Bowen. Fonte: Bowen (1928).

A série descontínua tem esse nome, pois à medida que a temperatura diminui, o mineral anteriormente formado reage com o líquido residual, dando origem a um mineral, que em condições de estabilidade, tem composição química e estrutura diferentes do mineral anterior. Já na série contínua ocorre apenas uma troca entre Ca e Na, fazendo com que o mineral formado tenha a mesma estrutura, mas diferente composição mineralógica.

As séries mostram os minerais mais susceptíveis a alterações para os menos susceptíveis, culminando ambas no quartzo, o último mineral a cristalizar-se, sendo este o mais resistente ao intemperismo. Entretanto, o quartzo não pode ser considerado inalterável, pois, em condições de clima tropical muito agressivos, o intemperismo químico pode dissolvê-lo.

A composição mineralógica do material parental também é decisiva no processo intempérico no que diz respeito a modificar o pH das soluções percolantes em função das

reações químicas que ocorrem. Por conta da ionização da água, íons H^+ , substituem cátions na superfície dos minerais, o que resulta no aumento do pH da fase líquida. A presença de minerais portadores de elementos alcalinos ou alcalinos terrosos possibilita a instalação de pH mais alcalino, já minerais sem elementos desse tipo geram condições de pH mais ácidas. Como visto em seção anterior, o pH da solução de alteração condiciona diferentes processos, com diferentes produtos do intemperismo.

A textura da rocha original influencia o intemperismo a medida em que permite maior ou menor infiltração de água. Entre os materiais sedimentares, os arenosos tendem a ser mais permeáveis que os argilosos. Considerando outras formações rochosas, aquelas com arranjos mais compactos e texturas mais grossas (menor superfície específica dos grãos) alteram-se mais lentamente que as menos compactas e de textura mais fina. É nesse sentido que o intemperismo químico, com sua ação de quebra do material parental atua auxiliando o intemperismo químico.

6.2.Clima

O clima determina o tipo e a velocidade do intemperismo, sendo o fator, que isoladamente, mais influencia no intemperismo. Os dois mais importantes parâmetros climáticos, a precipitação e a temperatura, regulam a natureza e a velocidade das reações químicas.

A quantidade de água disponível nos perfis de alteração, fornecida pelas chuvas, assim como a temperatura, agem no sentido de acelerar ou retardar as reações do intemperismo, ou ainda modificar a natureza dos produtos neoformados. Já a temperatura desempenha um papel duplo, condicionando a ação da água: ao mesmo tempo que acelera as reações químicas, aumenta a evaporação, diminuindo a quantidade de água disponível para a lixiviação dos produtos solúveis. A cada 10° de aumento da temperatura, as reações químicas tendem a aumentar de 2 a 3 vezes.

Em virtude disso, o intemperismo é mais pronunciado nos trópicos, onde a alteração é intensa, afetando os minerais alteráveis, dando lugar a produtos secundários neoformados. Em geral, os minerais primários estão ausentes, com exceção daqueles mais resistentes, como o quartzo e a muscovita, por exemplo. Os perfis, nesse caso, apresentarão geralmente, maior profundidade. Nos climas mais frios, a alteração afeta os minerais primários menos

resistentes, como por exemplo, os ferromagnesianos, deixando inalterados os aluminossilicatos.

6.3. Topografia

A topografia ou relevo, regula a velocidade de escoamento superficial das águas pluviais. Esse escoamento superficial também é dependente da cobertura vegetal. O relevo, portanto, controla a quantidade de água que infiltra nos perfis, cuja a eficiência em promover ação intempérica depende também da eliminação dos componentes solúveis.

As reações do intemperismo ocorrem mais intensamente nos compartimentos do relevo onde é possível boa infiltração da água, percolação por tempo suficiente para a consumação das reações e drenagem para a lixiviação dos produtos solúveis. A repetição deste processo permite que os componentes solúveis sejam eliminados e conseqüentemente ocorre o aprofundamento do perfil.

A figura 3 mostra, esquematicamente, a influência da topografia na intensidade do intemperismo. O setor A apresenta boa infiltração e drenagem, favorecendo o intemperismo químico. O setor B, boa infiltração, porém má drenagem, desfavorecendo o intemperismo químico. E o setor C a apresenta má infiltração e má drenagem, o que além de desfavorecer o intemperismo químico, favorece a erosão.

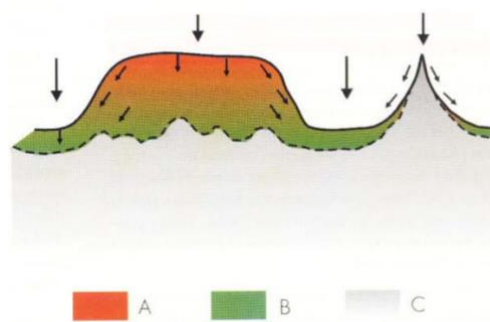


Figura 3. Influência da topografia na intensidade do intemperismo.

6.4. Biosfera

A matéria orgânica morta no solo decompõe-se, liberando CO₂, cuja concentração nos poros do solo pode ser até 100 vezes mais que na atmosfera, o que diminui o pH das águas de infiltração. O pH no entorno das raízes das plantas fica entre 2 e 4. Isso é

particularmente importante no comportamento do alumínio, que sendo pouco solúvel nos meios normais, torna-se bastante solúvel em pH abaixo de 4.

A biosfera também participa mais diretamente no processo intempérico através da formação de moléculas orgânicas que são capazes de complexar cátions dos minerais, colocando-os em solução. Os ácidos orgânicos produzidos por microrganismos são capazes de extrair até mil vezes mais ferro e alumínio dos silicatos que as águas das chuvas. Superfícies rochosas colonizadas por líquens que secretam ácido oxálico e ácidos fenólicos, são atacadas pelo intemperismo químico muito mais rapidamente que superfícies rochosas nuas diretamente expostas a outros agentes.

6.5. Tempo

O tempo é o fator que é condicionado pela intensidade dos demais fatores. Em outras palavras, o tempo necessário para o intemperismo diminui, em função do aumento da intensidade dos fatores clima e organismos e do aumento das condições mais favoráveis do material parental e do relevo. Ou seja, em condições de intemperismo pouco agressivas, é necessário um tempo mais longo de exposição às intempéries para haver o desenvolvimento de um perfil de alteração.

É possível calcular a taxa anual de intemperismo através de estudo de balanço de massa em pequenas bacias. Valores da ordem de 20 a 50 metros por milhão de anos pode ser considerados representativos como velocidade de alteração do perfil de alteração em climas mais agressivos.

7. Índices de intemperismo

Os índices de intemperismo são parâmetros geoquímicos utilizados para avaliar o grau de alteração química das rochas e dos solos, especialmente a intensidade da remoção de bases e a concentração residual de elementos relativamente imobilizados, como o alumínio. Eles são amplamente empregados em pedologia, geoquímica, sedimentologia e estratigrafia para inferir condições paleoambientais, climáticas e o estágio de evolução dos materiais intemperizados.

O índice mais clássico é o Índice de Alteração Química (CIA – Chemical Index of Alteration), que expressa o grau de lixiviação de cátions móveis, como cálcio, sódio e

potássio, em relação ao alumínio. Valores baixos indicam intemperismo incipiente, típico de climas frios ou áridos, enquanto valores elevados refletem intemperismo químico intenso, comum em regiões tropicais úmidas, com formação de argilominerais ricos em alumínio e, em estágios avançados, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio.

O Índice de Alteração Química (CIA – Chemical Index of Alteration) é definido pela fórmula: $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \times 100$

onde CaO* representa apenas o cálcio presente em silicatos (excluindo carbonatos, fosfatos e sulfatos). Valores de CIA em torno de 45–55 indicam material pouco intemperizado, próximo à rocha-mãe; valores entre 60–75 refletem intemperismo moderado, com formação de argilominerais; e valores acima de 80 indicam intemperismo intenso, típico de solos tropicais altamente evoluídos.

Relacionado ao CIA está o Índice de Intemperismo Químico (CIW – Chemical Index of Weathering), que exclui o potássio do cálculo, focando principalmente na remoção de cálcio e sódio associados a plagioclásios. Esse índice é particularmente útil para avaliar estágios iniciais de intemperismo e processos de alteração de feldspatos cálcico-sódicos.

O **Índice de Intemperismo Químico (CIW – Chemical Index of Weathering)** é expresso por: $CIW = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O)] \times 100$

Esse índice exclui o potássio, sendo mais sensível à alteração de **plagioclásios cálcico-sódicos**. Valores baixos indicam alteração incipiente, enquanto valores elevados indicam intensa lixiviação de Ca e Na.

Outro índice amplamente utilizado é o Índice Plagioclásio–Alumina (PIA – Plagioclase Index of Alteration), desenvolvido para quantificar especificamente o grau de alteração dos plagioclásios. Ele é sensível à transformação desses minerais em argilas e é bastante empregado em estudos sedimentares e paleoclimáticos.

O Índice de Alteração do Plagioclásio (PIA – Plagioclase Index of Alteration) é calculado por:

$$PIA = [(Al_2O_3 - K_2O) / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O - K_2O)] \times 100$$

O PIA isola a contribuição dos plagioclásios, descontando o alumínio associado aos feldspatos potássicos. Valores próximos de 50 indicam plagioclásios pouco alterados, enquanto valores acima de 90 indicam alteração quase completa para argilominerais.

O Índice de Alteração Química de Parker (WIP – Weathering Index of Parker) difere dos anteriores por dar maior peso aos cátions mais móveis, como sódio, cálcio, magnésio e potássio, sem normalização direta pelo alumínio. Valores elevados de WIP indicam materiais pouco intemperizados, enquanto valores baixos refletem intemperismo avançado, sendo especialmente útil para comparar materiais parentais distintos.

O Índice de Intemperismo de Parker (WIP – Weathering Index of Parker) é definido por:

$$\text{WIP} = (2\text{Na}_2\text{O} / 0,35) + (\text{MgO} / 0,9) + (2\text{K}_2\text{O} / 0,25) + (\text{CaO} / 0,7)$$

Diferentemente dos índices baseados em Al_2O_3 , o WIP enfatiza a presença de cátions altamente móveis. Valores elevados indicam material fresco ou pouco intemperizado, enquanto valores baixos refletem forte intemperismo químico.

Além desses, existem índices baseados na razão entre sílica e sesquióxidos, como o índice $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ou $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$, frequentemente utilizados para avaliar o grau de dessilicização em solos tropicais. Razões elevadas indicam intemperismo fraco a moderado, enquanto razões baixas refletem intensa remoção de sílica e enriquecimento residual em alumínio e ferro.

Em estudos pedogenéticos, também são usados indicadores como a relação bases/Al ou a saturação por bases, que, embora não sejam índices geoquímicos clássicos, fornecem informações complementares sobre o estágio de intemperismo e lixiviação do sistema solo.