

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA**

**LATERITAS E PROCESSOS
DE LATERITIZAÇÃO
(AULA INAUGURAL DE 1994)**

ADOLPHO JOSÉ MELFI

**SÃO CARLOS, 1994
PUBLICAÇÃO 093/94**

APRESENTAÇÃO

A área de pós-graduação em Geotecnia da USP / São Carlos instituiu, em 1992, a sua aula inaugural do ano letivo de pós-graduação.

A aula inaugural de 1994, a terceira consecutiva, ocorreu em 25/03/94 e foi ministrada pelo eminente geólogo Adolpho José Melfi, Professor Titular do IG-USP e Pró-Reitor de Pós-Graduação da Universidade de São Paulo.

O texto obtido a partir da gravação da palestra em fita de vídeo-cassete, revisado pelo Prof. Melfi, merece ser publicado para uma maior divulgação entre os alunos da EESC-USP, inclusive os de graduação.

Agradecemos ao Prof. Melfi pela sua valiosa colaboração e ao CETEPE pela gravação e reprodução escrita da conferência.

São Carlos, dezembro de 1994

Prof.Dr. José Carlos A. Cintra

LATERITAS E PROCESSOS DE LATERITIZAÇÃO

Adolpho José Melfi

INTRODUÇÃO

Inicialmente, gostaria de agradecer o convite formulado pelo Prof. Dr. José Carlos A. Cintra, coordenador do programa de pós-graduação em Geotecnia do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos, para ministrar a aula inaugural do Curso de Pós-Graduação em Geotecnia, referente ao ano letivo de 1994. Com imenso prazer aceitei o convite e sinto-me bastante honrado de ter o privilégio de poder falar um pouco sobre as lateritas para os colegas e estudante ligados a este campo tão importante e interessante, que é o da geotecnia.

Na aula de hoje não irei abordar tópicos referentes às propriedades físicas, que como sabemos são aqueles que mais interessam à geotecnia. Porém, tratarei especificamente de alguns aspectos geoquímicos e mineralógicos que, apesar de pouco estudados entre nós, são essenciais, não só para a compreensão da gênese e da distribuição destes materiais nas paisagens tropicais, mas também para o entendimento de seu comportamento mecânico, o qual depende essencialmente de sua composição mineralógica e organização.

De uma maneira bem generalizada, denominamos laterita o manto de alteração, normalmente espesso e de cor vermelha, endurecido ou friável, que nos países tropicais, recobre o substrato rochoso. Seu estudo, iniciado no começo do século passado, com os trabalhos de Buchanann sobre os solos tropicais da Índia, constitui um dos tópicos da mais alta relevância dentro das Ciências da Terra em regiões tropicais.

Se observarmos sua distribuição mundial (Fig.1), vemos que cerca de 40% das terras emersa do globo são recobertas por lateritas. No Brasil (Fig. 2), as lateritas recobrem perto de 65% da área total do país. Estas áreas, em ambos os casos, situam-se nas zonas intertropicais, situadas

grosseiramente entre os paralelos 30° N e 30° S de latitude. Entretanto, sua extensão pode ser relativamente mais importante, pois áreas situadas fora da cintura tropical podem apresentar formações lateríticas (Sibéria, Europa Central, etc.). Atualmente, com o conhecimento que possuímos sobre a idade destas formações, que vão desde o pré-cambriano até o quaternário recente e com os modelos de posicionamento relativo dos continentes (teoria das placas), podemos entender perfeitamente sua distribuição espacial fora da cintura intertropical.

→ “ Pela extensão geográfica que estas formações ocupam é fácil compreender a importância que apresentam para o mundo tropical, pois a maior parte das atividades realizadas pelos homens, na superfície do solo, é efetuada sobre lateritas.” A importância do estudo das lateritas é tanto maior, quando sabemos que os países que se situam na zona tropical são países em desenvolvimento e que portanto apresentam uma economia fortemente dependente da exploração de seus recursos naturais, quase todos eles obtidos direta ou indiretamente das lateritas. O estudo das lateritas interessa a vários setores das geociências, destacando-se:

a) **geologia econômica** - o interesse do estudo reside no fato de que as lateritas podem influir no potencial mineral de uma área. Esta influência pode ser observada de duas diferentes maneiras: por um lado, este espesso manto de alteração, quase contínuo, pode mascarar rochas mineralizadas subjacentes, tornando difícil uma correta avaliação do potencial mineral de áreas promissoras; por outro lado, as lateritas podem, elas mesmas, concentrar certos elementos até níveis exploráveis, como por exemplo ferro, níquel, manganês, alumínio, e outros, formando excelentes jazidas minerais (ferro de Carajás, alumínio de Poços de Caldas, Manganês de Serra do Navio, Amapá, etc).

b) **pedologia** - os solos das regiões tropicais são predominantemente lateríticos e portanto, a maior parte do potencial agrícola dos países do 3° mundo, cuja economia é essencialmente ligada às atividades agrícolas, depende destas formações;

c) **geologia de engenharia** - a importância do estudo das lateritas está relacionada não só à sua larga utilização como material de construção de estradas, barragens, etc, mas também pelo fato de que as grandes obras de engenharia possuem suas fundações encravadas nos materiais lateríticos;

d) hidrogeologia - em algumas regiões tropicais semi-áridas, como por exemplo o Sahel, todos os recursos em água, que alimentam os poços, vêm de aquíferos situados no interior de formações lateríticas;

e) paleoclimatologia - sobre estes imensos continentes lateríticos, onde nada permite datar ou mesmo conhecer os eventos que marcaram sua evolução temporal, são as lateritas que contêm as marcas dos paleoclimas que se sucederam nestas regiões, tectonicamente estáveis (convém lembrar que as lateritas são formações, por vezes, bastante antigas, podendo apresentar evoluções que datam do Cretáceo, ou talvez mesmo do Jurássico ou Triássico).

DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DAS LATERITAS

Laterita, como todos sabem, foi definida em 1807, na Índia, pelo geógrafo inglês Buchanann. O que ele denominou de laterita eram argilas endurecidas, sem estratificação, extremamente porosas, ricas em cavidades e que possuíam grandes quantidades de ferro na forma de óxidos e hidróxidos de coloração amarelo avermelhada. O que chamava atenção nesse material era o fato de que fora do contato com o ar, ele podia ser facilmente cortado com um canivete ou com qualquer instrumento metálico, mas que quando em contato com o ar, sofria um notável endurecimento, de maneira irreversível, produzindo um excelente material para construção (*later*, do latim ladrilho).

O que Buchanann chamou de laterita não era um perfil completo de solo (perfil laterítico, como conhecemos atualmente), mas somente um horizonte, que hoje denominamos de horizonte plíntico, encontrado em certos solos, que os pedólogos brasileiros classificam como laterita hidromórfica.

Buchanann, F. (1807) - A journey of Madras, London.

O termo laterita criado por Buchanann teve seu significado profundamente modificado com o correr dos tempos, sendo ampliando por uns (solos, formações superficiais, couraças, carapaças, etc) e restringido por outros (somente formações ferruginosas endurecidas). Maignien (1966) na sua clássica obra "Compte-rendu de recherches sur les laterites" mostra a ambiguidade existente, ressaltando que o termo laterita utilizado por geólogos, engenheiros e pedólogos nem sempre define o mesmo objeto e nem sempre tem o mesmo significado.

A partir de 1978, organismos internacionais, como a Associação Internacional de Geoquímica e Cosmoquímica e a UNESCO, através de seu Programa Internacional de Correlação Geológica, tendo em vista a importância que estes materiais apresentam para os países em vias de desenvolvimento, começaram a se interessar pelo problema, procurando, através da formação de grupos de trabalho, uniformizar os conceitos adotados pelos diferentes campos das geociências e melhor compreender sua gênese, distribuição e propriedades. No Seminário Internacional sobre Processos de Lateritização, realizado em São Paulo, em 1982, foi apresentada por Schellmann, como resultado dos estudos efetuados pelos grupos de trabalho, a moderna definição de laterita *"acumulações superficiais ou subsuperficiais de produtos provenientes do intenso intemperismo de rochas, desenvolvidos sob condições favoráveis a uma maior mobilidade dos elementos alcalinos, alcalino-terrosos e sílica e imobilização de ferro e de alumínio"*. Condições de alta temperatura e forte umidade (características de regiões tropicais, limitadas a uma faixa balizada pelos paralelos 30°N e 30°S de latitude) favorecem a lateritização. Estas formações consistem de uma paragênese mineral relativamente simples, onde predominam óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio (goethita, hematita, gibbsita e materiais amorfos) e argilominerais do grupo da caulinita, além do quartzo, que devido a sua alta estabilidade na superfície, representa o mineral residual do intemperismo.

→ Fica evidente pela definição adotada que as lateritas, apesar de formadas a partir de um único processo, podem englobar vários tipos de produtos, pois a intensidade do processo pode variar de local para local, assim como o tipo de material de origem, tempo de atuação do processo, etc.

Maignein, R. (1958) - Compte rendu de recherches sur les latérites. UNESCO, 155p.

Desta forma, as lateritas apresentam propriedades físicas (cor, "fabric", dureza, consistência, etc), químicas, físico-químicas e mineralógicas (aluminosas, ferruginosas, manganesíferas, níquelíferas, etc) diferentes. A laterita descrita por Buchanann, por exemplo, deve ser considerada como um tipo pertencente à família das bauxitas, cujos membros têm propriedades diferentes, porém uma única gênese.

Várias classificações foram utilizadas na tentativa de agrupar os diferentes tipos de lateritas dentro de sistemas múltiplos.

A primeira classificação foi idealizada por Lacroix, em 1913, que catalogou as lateritas com base na porcentagem de sesquióxidos presentes. Outras classificações, mais modernas e melhores adaptadas são aquelas apoiadas em bases químicas e mineralógicas e nos aspectos físico-morfológicos (Konta, Valeton, Bardossy, Aleva, etc). Um inconveniente que estas classificações apresentam é de só levar em conta os óxidos de ferro e de alumínio, além da caulinita e deixarem de lado o quartzo, mineral residual, quase sempre presente e não formado no processo de lateritização. Como consequência, uma laterita formada sobre um arenito e contendo cerca de 80% de quartzo, 17% de hematita e 3% de caulinita, pode ser classificada como uma laterita ferruginosa ou minério de ferro.

Para evitar este inconveniente, foi proposta uma nova classificação (Schellmann, 1982) utilizando uma base química/mineralógica (Fig. 3). Esta classificação adota a representação triangular, levando em conta os teores de silício, alumínio e ferro em função dos minerais presentes (quartzo, caulinita, hematita-goethita e gibbsita). Neste diagrama constatamos a existência de diferentes tipos de lateritas: *laterita silícica*, rica em quartzo, *laterita ferruginosa*, rica em ferro e que formam as couraças ferruginosas, *laterita aluminosa*, rica em alumínio e que freqüentemente constituem os depósitos de bauxita (minério de alumínio, como por exemplo a alteração das rochas alcalinas do maciço de Poços de Caldas), *lateritas argilosas*, possuindo teores elevados em caulinita, podendo por vezes formar depósitos de argila (caulins) e finalmente as *lateritas stricto sensu*, que representam o material caracterizado pela paragênese mais comum dos solos tropicais, caulinita associada a quantidades variáveis de hematita, goethita e gibbsita.

Schellmann, W. (1982) - Considerations on the definition and classification of laterites. Proc. Int. Seminar on Lateritisation Processes (Trivandrum, 1979). Oxford IBH Publish. 1-10.

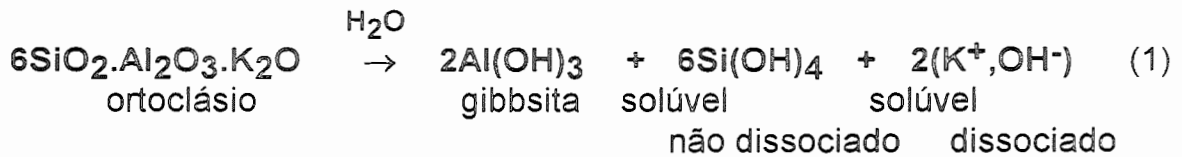
GENESE DAS LATERITAS

// O que caracteriza o meio tropical são as condições de alta temperatura e de alta pluviosidade. A alta temperatura tem um papel essencial na alteração das rochas, pois vai definir as características físico-químicas das soluções de alteração. A evolução da matéria orgânica é de fundamental importância para o intemperismo. Ao contrário do que acontece nas regiões frias e temperadas, onde a lenta evolução da matéria orgânica permite a formação de compostos orgânicos que tem um papel fundamental nas características complexantes e ácidas das soluções de alteração, as altas temperaturas, encontradas nas regiões tropicais, promove a rápida degradação da matéria orgânica, que é totalmente mineralizada, dando origem a água e CO_2

Assim, as soluções de alteração que ocorrem nos meios tropicais são caracterizadas por uma certa carga em CO_2 , que confere a estas soluções características levemente ácidas (pH ~ 5,5 - 6). Este parâmetro é fundamental para a alteração, pelo fato de controlar de forma específica o comportamento dos principais elementos constituintes dos minerais formadores das rochas (alumínio, sílica, ferro, alcalino e alcalino-terrosos). Assim, nestas condições de pH, o alumínio e o ferro são, praticamente, insolúvel (Fig. 4), acumulando-se na forma de óxidos e/ou hidróxidos. Os elementos alcalinos e alcalinos terrosos são totalmente lixiviados, enquanto que a sílica é também mobilizada, porém com velocidade mais baixa do que os alcalinos, havendo possibilidade, em certas situações, de recombinação de parte desta sílica com o alumínio que permanece "in situ", gerando argilominerais. Do ponto de vista geoquímico este mecanismo de alteração é conhecido pelo nome de **hidrólise**.

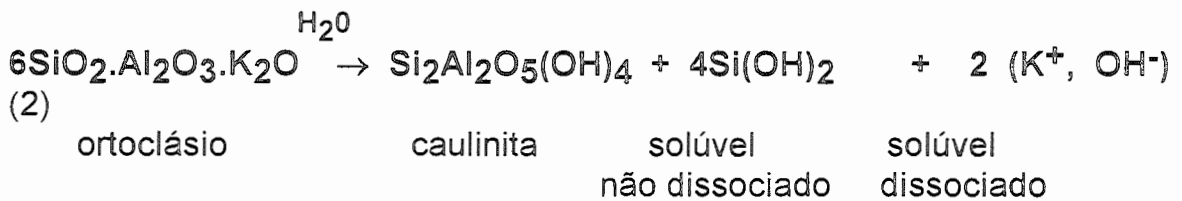
Os diferentes tipos de constituintes formados vão depender da velocidade de fluxo das soluções de alteração, isto é da drenagem. Como o alumínio e o ferro permanecem sempre "in situ", a velocidade de fluxo vai definir o comportamento relativo da sílica e das bases. O grau de eliminação destes elementos caracteriza os diferentes tipos da hidrólise:

* **hidrólise total** - toda a sílica e bases são eliminadas. Neste caso, todos os elementos envolvidos na reação de alteração aparecem sob a forma de hidróxidos independentes, dissociados ou não.



* **Hidrólise parcial** - somente parte dos elementos envolvidos na alteração aparece sob a forma de hidróxidos. Parte deles aparece reagindo com o alumínio, formando compostos com ligações ânions-cátions (sais básicos) que são hidrossilicatos (argilas). Neste caso a despolimerização da sílica é parcial, assim como sua eliminação. Duas situações são possíveis, em função da velocidade de eliminação das bases:

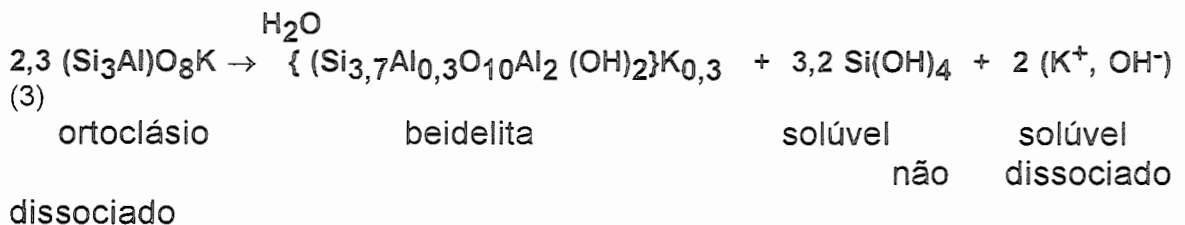
- *todas as bases são eliminadas*



Neste caso temos,

100% das bases eliminadas
 60% da sílica eliminada } Hidrólise parcial
 0% do alumínio eliminado

- *somente parte das bases não são eliminadas*



Grau da hidrólise	Hidrólise total	Hidrólise parcial	
Geoquímica da Dessilicificação	Dessilicificação Total	Dessilicificação parcial	
	Alitização	Sialitização	
Caracterização	Hidróxido de alumínio	Silicatos argilosos	
Cristaloquímica	Gibbsita	Tipo 1/1 caolinita	Tipo 2/1 smectitas
Processo de alteração	Alitização	Monossilicificação	Bissialitização
Geoquímica da desalcalinização	Desalcalinização total		Desalcalinização parcial

Tabela I. Características geoquímicas e cristaloquímicas da alteração hidrolítica

Neste caso temos,

87% das bases eliminadas	}	Hidrólise parcial
46% da sílica eliminada		
0% do alumínio eliminado		

No primeiro caso, a hidrólise total leva à concentração de alumínio (e ferro). Harrassowitz (1926) denominou de alitização (reação 1).

No segundo caso, tendo havido formação de silicatos, Harrassowitz (1926) denominou de sialitização. Pedro (1964) chamou de monossialitização (reação 2) quando o mecanismo hidrolítico leva à formação de caulinita (argilomineral 1/1 ou a 7Å), e bissialitização (reação 3) quando o mecanismo conduz à formação de argilominerais 2/1, do tipo esmectita.

Vê-se pois que em função do fluxo das soluções, e mantidas fixas as condições de pH e de concentração, pode-se ter a formação de hidróxidos de alumínio (gibbsita), caulinita ou esmectita.

A tabela 1 resume a caracterização geoquímica e cristalóquímica dos mecanismos da alteração hidrolítica.

Se ao invés de um silicato de alumínio, como o ortoclásio, tivéssemos um silicato de ferro (piroxênio), a alteração se processaria de uma maneira ligeiramente diferente. Como os piroxênios se alteram rapidamente, o fluxo das soluções teria um papel menos importante; em todas as três situações retro mencionadas haveria formação de hidróxido de ferro, que se precipita e permanência em solução da sílica e do magnésio, que seriam exportados do perfil de alteração. É o que acontece na alteração tropical de rochas ricas em silicatos de ferro e magnésio e pobres em alumínio (dunitos, piroxenitos, etc).

Harrassowitz, H. (1926) - Laterit. Fortschr. Geol. Paleont. Berlin, 4: 253-565.

Pedro, G. (1964) - Contribution à l'étude expérimental de l'altération géochimique des roches cristallines. Ann. Agron. 15: 85-191; 243-333; 339-456.

Nas regiões tropicais, as condições de alta pluviosidade possibilitam a existência de elevados fluxos de soluções. Desta forma, no processo de intemperismo temos: (a) alteração dos minerais primários, que se traduz por uma desalcalinização completa, com acumulação integral "in situ" do ferro e do alumínio (acumulação relativa), e (b) ferro livre, que se individualiza separada e independentemente dos constituintes argilosos (caulinita).

Assim, a lateritização ou ferralitização (denominação utilizada comumente) caracteriza-se por duas grandes paragêneses:

- a) paragênese hidróxido de alumínio-oxihidróxidos de ferro, que corresponde à ferralitização s.s. ou ultraferralitização;
- b) paragênese caulinita-oxihidróxidos de ferro, característica da ferralitização s.l. ou ferralitização caulínica.

Portanto, vê-se que a lateritização leva à formação de materiais superficiais desprovidos de minerais primários (exceto o quartzo) e formado essencialmente, porém em proporções diferentes e variáveis, de caulinita, oxi-hidróxidos de ferro e hidróxidos de alumínio. A constituição geral é relativamente simples, porém pode-se, facilmente, imaginar que graças a intervenção de um certo número de evoluções secundárias pode ocorrer a individualização de formações superficiais bem diferentes, sobretudo no que diz respeito as organizações internas.

PRINCIPAIS FÁCIES DA ALTERAÇÃO LATERÍTICA

De uma maneira geral os fenômenos de alteração tropical se desenvolvem, quase sempre, sob condições quentes e úmidas. Entretanto, as modalidades de sua atuação não são necessariamente, análogas, face às variações climáticas que ocorrem dentro da zona tropical no decorrer do tempo.

Como foi dito anteriormente, as formações lateríticas são caracterizadas por possuírem grandes espessuras (no distrito mineral de Carajás encontramos perfis lateríticos com mais de 400m de espessura). Nestes perfis podem ser separados dois grandes conjuntos de horizontes, que se distribuem verticalmente e lateralmente de maneira bem diversa. A

partir da rocha alterada e até a superfície do solo, estes dois conjuntos se sucedem progressivamente ou apresentam descontinuidades aparentes (Fig. 5). O conjunto inferior é de alteração (alterita) e o conjunto superior é caracterizado pelas evoluções pedológicas, que permitem acumulações de óxidos e hidróxidos metálicos e argilas (solum).

No conjunto inferior de alteração, as estruturas e os volumes originais da rocha fresca são, em geral, preservados, apesar de que perdas de matéria por dissolução, possam ser consideráveis, podendo atingir 80% sobre determinados tipos de rocha (ultramáficas). Os minerais primários podem ser totalmente substituídos por minerais secundários (por exemplo a bauxita de Poços de Caldas) sem que a estrutura original da rocha seja destruída.

No conjunto superficial ocorrem acumulações de óxidos, hidróxidos e argilominerais. As organizações litoreliquiais precedentes podem ser conservadas, mas geralmente apresentam-se transformadas, total ou parcialmente. As estruturas de acumulação contínuas (couraças ou carapaças) ou descontínuas (nódulos ou pisólitos) são invariavelmente endurecidas. Ocorre também desorganizações e degradações das estruturas precedentes e formação de estruturas muito porosas.

Estes dois conjuntos de diferenciação dos perfis lateríticos podem apresentar entre si discordâncias. Algumas vezes um deles pode estar ausente, mas em geral podem mostrar sucessões complexas de diferentes fácies.

Antes de discutirmos as fácies encontradas na alteração laterítica vamos retornar ao perfil laterítico (Fig. 5). Encontramos de baixo para cima uma sucessão de horizontes: rocha fresca, rocha alterada compacta, rocha alterada friável com estrutura preservada, um nível onde não se reconhece mais a estrutura original da rocha e finalmente, o solo, com diferentes horizontes formados a partir da diferenciação pedológica. Esta sucessão é acompanhada, de um lado, pela diminuição progressiva da densidade aparente e, de outro, pelo aumento da porosidade, face ao desenvolvimento de um importante sistema poral. A hidratação também aumenta. Desta forma o perfil fica caracterizado pela densidade, porosidade e teor em água (perfil hídrico).

Na zona de rocha alterada compacta a porosidade é baixa e inteiramente ocupada pela água (teores baixos). A medida que se sobe no perfil a porosidade aumenta, até um valor máximo, o mesmo acontecendo com o teor em água. No nível superior, que corresponde à cobertura pedológica, a porosidade é máxima, porém em função da evapotranspiração, que se produz no contato atmosfera-biosfera, o teor em água pode ser variável.

Evidentemente, a alteração dos minerais não ocorre da mesma forma nestas diferentes zonas, pois as condições hídricas não são as mesmas. Estudos microestruturais mostraram que diferentes sistemas de alteração estão presentes nas diferentes zonas.

Assim, no início da alteração, quando ainda os minerais se encontram justapostos, a porosidade é baixa e os poros se encontram preenchidos por soluções concentradas. A alteração se produz no interior de microsistemas de contato. São comuns nestes microsistemas a formação de micas ou de minerais que exibem equilíbrios com soluções concentradas.

Desde que a rocha torna-se mais friável, os minerais endógenos se degradam, formando plasmargilosos, através do desenvolvimento de microsistemas plásmicos, onde ocorre desestabilizações dos minerais primários e formação de plasmargilosos primários e secundários. Finalmente, quando o material se encontra completamente desagregado, desenvolve-se o sistema fissural, com formação de grandes canais e grandes poros por onde as soluções circulam livremente. É aí que se acumulam os depósitos cutânicos.

Considerando agora o perfil típico da alteração, as seguintes fácies podem ser encontradas, em função da atuação de diferentes mecanismos de evolução.

Fácies da zona inferior de alteração - Fácies alteritas

Dois grandes tipos de mecanismo contribuem para a formação e acumulação de minerais secundários nesta fácies:

- mecanismos de alteração que, associados à perda de matéria, são responsáveis pela acumulação de produtos residuais ou de **acumulação relativa**;

- mecanismos de transferência, que são responsáveis pela acumulação por chegada de matéria (ganho de matéria) ou **acumulação absoluta**.

A. Transferências de matéria em rochas mães fissuradas (anteriores à alteração)

Em certas situações, na base de perfis lateríticos situados sobre rochas fissuradas, antes mesmo da alteração intempérica se instalar, pode ter início a diferenciação da alterita, por transferência de materiais secundários que preenchem as fissuras da rocha fresca. Boulangé (1984) cita o exemplo da Costa do Marfim, onde um granito fraturado, que suporta uma espessa formação bauxítica, mostra a presença de acumulações de produtos amorfos sílico-aluminosos e haloisitas, que preenchem as fissuras da rocha ainda fresca. Estas fissuras recortam minerais primários ainda não alterados, colocando em contato produtos alterados e minerais frescos. É evidente que a neogênese dos minerais secundários independe dos minerais primários fissurados e é anterior à sua alteração. São acumulações absolutas de matéria.

B. Alterações pseudomórficas dos minerais primários

Em condições tropicais úmidas, os silicatos formadores das rochas podem se alterar diretamente em oxi-hidróxidos metálicos (Fe, Al, principalmente) ou em filossilicatos argilosos (predominantemente caulinita). Estas fases secundárias se desenvolvem pseudomorficamente sobre os minerais primários e garantem ou contribuem para a preservação das texturas e estruturas das rochas originais. A natureza das fases secundárias e as formas destas pseudomorfoses diferem de acordo com as composições químicas dos minerais primários e com a origem das diferentes transferências de matéria.

Boulangé, B. (1984) - Les formations de bauxites latéritiques de Côte D'Ivoire. Thèse de Doctorat es Science. Université Paris VII. 320p.

B.1. Pseudomorfoses definidas por cercas ou paredes periféricas de oxi-hidróxidos metálicos.

Quando da alteração de um feldspato, por exemplo, a precipitação da gibbsita $[Al(OH)_3]$ ocorre na periferia do cristal ou ao longo de suas clivagens. Forma-se então uma cerca ou uma parede que preserva a forma exterior e o volume original do feldspato. O alumínio migra, em solução, por uma curta distância, que vai do interior do cristal até à sua periferia, onde se forma a cerca de gibbsita. Esta acumulação relativa do alumínio se faz por intermédio de transferências intracristalina, denominadas de nanotransferts intracristallins.

Com a evolução das alterações, as paredes ou cercas aumentam de espessura e ocorre a colmatação dos vazios interiores, deixados pela dissolução completa do mineral primário, com novas gerações de gibbsita. Neste caso, o alumínio deve provir de alterações posteriores de outros minerais aluminosos vizinhos. São as denominadas **microtransfertências intercristalinas** (Boulangé, 1984).

De modo análogo, na alteração de olivinas, piroxênios, anfibólios e biotitas (minerais ferro-magnesianos), o ferro constitui as cercas goethíticas, que igualmente garantem a pseudomorfose destes minerais,

B.2. Pseudomorfoses com substituição interna do mineral primário por diferentes argiloplasmas de alteração

Se a alteração dos minerais primários for menos intensa, produtos amorfos sílico-aluminosos e mais geralmente plasmas argilosos substituem progressivamente o mineral primário. A desestabilização deste último propaga-se, freqüentemente, a partir de bolsas interiores em direção à periferia.

Se a alteração de cada mineral primário se realiza independentemente da de seu vizinho, as fases argilosas neoformadas refletem e memorizam a composição química do mineral original. As transferências de elementos permanecem intracristalinas. Assim, progressivamente, os feldspatos e plagioclásios se alteram em produtos amorfos sílico-aluminosos e posteriormente em caulinita.

Porém, em geral, vários minerais primários podem se alterar simultaneamente. Seus produtos de alteração resultam então da interação química e de transferências intercristalinas. Assim, na alteração de rochas ultrabásicas, o plasma esmectítico que pseudomorfiza as olivinas magnesianas (forsterita), é enriquecido de alumínio, proveniente da alteração simultânea dos piroxênios vizinhos (Nahon et Colin, 1982).

Desta forma, produtos secundários ligados à alteração superficial em clima tropical, sejam eles óxidos, oxi-hidróxidos ou diferentes argilominerais, podem assegurar a conservação das texturas e estruturas originais das rochas, gerando uma rede de paredes ou cercas (box-work) e de pseudomorfoses internas. Estas duas alterações pseudomórficas se realizam por transferência de matéria em diferentes escalas: aquela do cristal, de diferentes cristais, do horizonte e da paisagem. Estas alterações caracterizam a alteração isovolume, que dá origem a certos saprolitos ou isoalteritas.

C. Transferências de matéria posteriores à alteração dos minerais primários

Após as alterações pseudomórficas da maior parte dos minerais primários, diversas acumulações absolutas se sucedem nas alteritas. No início, estas acumulações se realizam no seu sistema poral e posteriormente no interior de seus plasmas.

C.1. Acumulações cutânicas

A porosidade fissural herdada da rocha original é reforçada, nas isoalteritas, por uma forte porosidade intra e intercristalina, que se desenvolve quando da dissolução dos minerais primários. Estas porosidade pode ser, ela mesma, recortada por sistemas de poros tubulares de origem biológica. Todas estas porosidades são sedes de uma sucessão de depósitos que resultam de transferências de matéria no estado dissolvido, de partículas ou de agregados de matéria proveniente dos horizontes situados acima das alteritas.

Assim, desde a base das alteritas podem ocorrer neogênese de haloisita e de caulinita, sob forma de cristalizações automórficas em "grandes sanfonas", cristalizações aciculares de goethita, depósitos cutânicos argilo-ferruginosos e depósitos de agregados de origem biológica.

C.2. Acumulações no interior dos plasmas das isalteritas

Os aportes mais significativos de matéria nas alterações tropicais são as acumulações ferruginosas que afetam, geralmente, o topo das alteritas. Elas introduzem importantes evoluções estruturais e mineralógicas, como por exemplo o endurecimento, com preservação da estrutura original ou a pedoturbação, com desaparecimento das estruturas primárias e substituições por novas estruturas.

É, principalmente, sob a forma de hematita que o ferro se acumula nas porosidades dos diferentes plasmas de alteração ou de transferência (Nahon, 1976). Estes meios plasmáticos apresentam, realmente, uma baixa microporosidade, a qual favorece a formação de hematita. Esta fraca microporosidade pode resultar da redução de uma porosidade originalmente mais importante, por preenchimento progressivo dos poros pelo ferro importado, inicialmente precipitado sob a forma de goethita, em um meio mais poroso (onde a goethita seria estável), como certos plasmas de alteração (cercas de goethita) ou de transferência (sanfona de caulinita) e depois recristalizado sob a forma de hematita, quando a porosidade se reduz pelo desenvolvimento das acumulações.

Estas acumulações ferruginosas resultam, principalmente, da transferência do ferro proveniente da degradação de conjuntos ferruginosos superiores ou situados a montante das paisagens ou ainda proveniente de redistribuições de ferro no interior das alteritas. No caso de uma isalterita argilo-ferruginosa, esta redistribuição leva ao desaparecimento das cercas goethíticas e a um colapso das texturas e estruturas originais da rocha. Assim, uma isoalterita se transforma em uma aloalterita, conforme denominação de Boulangé (1984).

Nahon, D. (1976) - Cuirasses ferrugineuses et encroûtement calcaires au Sénégal Oriental et Mauritanie. Sci. Géol. Mém. 44, 232p.

Fácies da zona superior - diversas fácies

A zona superior, isto é a parte somital do perfil, é aquela onde o material de origem não é mais a rocha mãe, mas sim a alterita, mais ou menos evoluída, podendo ser uma isoalterita ou uma aloalterita. Nesta zona, a alterita sofre, não somente a ação dos processos de alteração, mas também e, principalmente, da pedogênese. Na formação das diferentes fácies encontradas na zona pedogenética é extremamente importante as condições hídricas, associadas às condições climáticas.

Na aula de hoje não teremos condições de examinar de maneira exaustiva todas as situações possíveis de atuação dos processos pedogenéticos sobre as alteritas. Entretanto, a fim de possibilitar a visualização do problema de uma forma global, consideraremos as 3 situações mais importantes, por representarem as condições mais comumente encontradas nas zonas tropicais, que serão descritas brevemente, sem discutir os permonores de todos os mecanismos envolvidos:

- a. meio úmido com fluxo permanente de soluções;
- b. meio úmido, alternativamente saturado e não saturado;
- c. meio alternativamente úmido e ultra seco.

a. **Meio úmido, com fluxo permanente de soluções** - é o caso das regiões tropicais onde a drenagem é livre e assegurada de uma maneira permanente. Isto significa que a saturação não é jamais atingida. A alteração ferralítica prossegue no solum através de uma evolução homegeneizante, do tipo pedoplasmação, com o estabelecimento e manutenção das ligações argila-hidratos férricos e individualização de um material uniforme (vermelho ou amarelo).

Esta é a via característica da pedogênese ferralítica (laterítica), que leva à formação de solos friáveis: solos ferralíticos ou latossolos. A evolução, do ponto de vista geoquímico, continua, no sentido da acumulação relativa, mas com modificações de pequena monta, que afetam essencialmente a composição físico-química do complexo de trocas das argilas (CTC), que pode, eventualmente, provocar uma maior dessilicificação e transformações no estado cristalino dos compostos

ferruginosos, provocando uma melhor cristalização de seus constituintes. O resultado é então uma série de transformações que, sem afetar a homogeneidade do sistema, afeta a organização dos constituintes associados, levando até a individualização de finos horizontes com estruturas alíticas, do tipo micronodular (pseudo partículas) que são chamados de horizontes óxicos (oxissolos da classificação Norte Americana).

b. Meio úmido, alternativamente saturado e não saturado - é o caso das regiões tropicais submetidas a uma flutuação do nível freático. Concerne, portanto, a uma parte do perfil (nível inferior do solum ou superior da alterita, denominado de argila mosqueada, "mottled clay") que, temporariamente permanece encharcado e por isso representa um meio anóxico e que funciona como um "pseudoglay".

Desta forma, nas zonas mais úmidas e, portanto, menos arejadas do horizonte considerado, ocorre redução do ferro ($\text{Fe}^{3+} + e^- \Rightarrow \text{Fe}^{2+}$), o qual torna-se móvel e migra em direção às zonas mais arejadas, que servem como verdadeiros poços de acumulação e onde, após o abaixamento do nível freático, a reação inversa se produz ($\text{Fe}^{2+} \Rightarrow \text{Fe}^{3+} + e^-$).

Esta evolução traduz-se então por uma separação das argilas e dos constituintes ferríferos e provoca a formação de um nível heterogêneo, comportando zonas cinzas, empobrecidas em ferro e zonas vermelhas, fortemente enriquecidas em ferro (segregação). O material argiloso das zonas cinzas, assim liberado do seu cimento, pode ser parcialmente evacuado, por ocasião do abaixamento do nível freático (lavagem), o que ocorre junto com uma compactação do conjunto, provocando conseqüente concentração de ferro, de início sob forma descontínua (nódulos) e depois contínua (carapaça). Ocorre assim, uma progressiva individualização da plintita, que corresponde sensivelmente à definição da laterita de Buchanann. Este material é susceptível de endurecer desde que exposto ao ar e dessecado, ou mesmo quando o horizonte fica definitivamente fora da zona de flutuação do nível freático, devido a um abaixamento generalizado do nível de base. Tem-se, portanto, neste caso, um material ferralítico, relativamente enriquecido em ferro, devido uma evolução particular ligada à flutuação do nível freático.

c. Meio alternativamente úmido e ultra seco - é o caso das regiões tropicais com estações fortemente contrastadas, onde a parte superior do material ferralítico (solum) é confrontado, durante a estação não chuvosa a condições ultra secas. Devido a este fato, a água fortemente absorvida na superfície dos minerais de alteração dessecados sofre uma sucção tão forte que pode ser dissociada, com liberação de prótons. É o que Chaussidon et Pedro (1979) denominaram de xerolise. A evolução neste caso se traduz pelos seguintes fenômenos:

- em uma primeira etapa, nas zonas mais secas do horizonte, os constituintes ferruginosos são, local e superficialmente, atacados, com o desenvolvimento de uma reação do tipo:

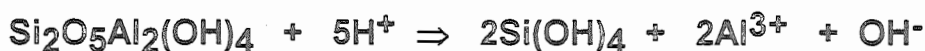


Os íons Fe^{3+} liberados migram em direção às zonas mais úmidas, que neste caso servem como poços de acumulação para o ferro e onde a reação inversa se produz:



Assim, manifesta-se, progressivamente, uma segregação, com as zonas mais secas e mais ácidas do horizonte sendo empobrecidas em ferro, enquanto que as zonas menos dessecadas começam a se enriquecer e individualizar o ferro sob a forma de nódulos, que tendem em seguida a se anastomosarem em uma formação contínua, carapaça e depois couraça.

- em uma segunda etapa, as zonas muito ferruginizadas tornam-se mais ácidas durante a estação seca, devido ao forte poder de polaridade do Fe^{3+} . Existe a possibilidade de ataque à caulinita, presente nos nódulos, que se dissolve e tende a desaparecer, segundo a equação:



Nesta fase, até o quartzo pode desaparecer por epigenia.

Chaussidon, J. & Pedro, G. (1979) - Rôle et l' état hydrique du système poreux sur l'évolution du milieu. Réalités de l'altération dans les systèmes à faibles teneurs en eau. Science du sol, 2-3: 223-237.

O alumínio liberado pode se associar aos íons de ferro férrico para dar origem a óxidos substituídos, do tipo goethita aluminosa ou hematita aluminosa, característicos destes tipos de formação.

Desta forma, a evolução se traduz por uma disjunção entre os materiais argilosos e os compostos ferríferos, com redistribuição heterogênea dos diferentes constituintes e individualização de um nível ferruginoso encouraçado em condições superficiais ou subsuperficiais.

É este o processo que dá origem às couraças que recobrem enormes superfícies na África Ocidental, no interior da zona sudaniana (clima tropical com estações contrastadas e que favorecem o encouraçamento generalizado - Fig.6).

Portanto, verifica-se que diferentes situações dentro da zona tropical pode levar à formação de materiais lateríticos totalmente diferenciados, com características mecânicas, propriedades físicas, físico-químicas e mineralógicas próprias. Em determinadas condições formam-se solos lateríticos friáveis e de grande interesse para a agricultura, em outras aparece a couraça ou carapaça ou então pode se formam ainda solos com horizontes enriquecidos em ferro, como o caso das plintitas.

EXTENSÃO E REPARTIÇÃO DAS LATERITAS NO BRASIL

O Brasil, como foi dito anteriormente, é um país essencialmente laterítico, haja visto que mais de 60% de sua superfície é recoberta por formações lateríticas (Fig. 2). Entretanto, esta cobertura não é homogênea, pois comporta diferentes tipos de materiais lateríticos. O tipo mais comum é aquele representado por materiais argilo-ferruginosos, friáveis, que os processos pedogenéticos transformaram em um solo muito fino, pulverulento, com microagregação característica (latossolos). Mais raramente, podemos encontrar formações endurecidas, tanto na forma contínua de couraças ou carapaças (Planalto Central do Brasil) ou descontínuas, como é o caso de certos solos nodulares do Nordeste Brasileiro.

Estas diferentes formações laterítica do Brasil apresentam uma distribuição de acordo com a posição que ocupam no relêvo.



De uma maneira bem generalizada, levando-se em conta a escala continental do país, podemos dizer que no Brasil o relevo resulta de uma evolução que teve início no Cretáceo superior, quando do soerguimento do continente sulamericano. Um longo período de erosão se estabeleceu, nivelando as paisagens brasileiras, sob a forma de um imenso peneplano, a **Superfície Sulamericana** (King, 1957). No Terciário inferior, durante a fase de agradação desta superfície, a alteração meteórica conduziu à formação de imensas cuberturas lateríticas.

Um novo soerguimento do continente se produziu no Terciário superior e um novo ciclo erosivo se estabeleceu, o ciclo Velhas (King, 1957). A **Superfície Sulamericana** foi em grande parte erodida e desmantelada, mas ainda é possível encontrar enormes testemunhos deste peneplano, bem conservados, no interior do país, onde elas formam o essencial do Planalto Central Brasileiro, cujas altitudes oscilam entre 500 e 1000m.

Testemunhos da **Superfície Velhas** são encontrados em diversas regiões do país, como por exemplo no Nordeste, na Amazônia, porém em posições bem mais baixas.

Sobre os testemunhos da **Superfície Sulamericana**, a alteração retomou sua progressão e sobre a **Superfície Velhas**, inferior e embutida na primeira, conduziu à formação de uma nova fase de lateritização.

Uma retomada de erosão sub-atual (Ciclo Paraguaçu) e atual entalhou estas duas superfícies e conduziu à formação de um novo conjunto de paisagens rejuvenescidas.

Os materiais superficiais que recobrem a **Superfície Sulamericana** são caracterizados por uma forte concentração em óxidos metálicos (Al, Fe, Mn...). No geral, são materiais muito argilosos, ricos em caulinita e oxihidróxidos de ferro e de alumínio (soma superior a 80% do material total), qualquer que seja a litologia sobre a qual estas formações repousam.

King, L. E. (1957) - A geomorfologia do Brasil Central. Rev. Bras. Geogr., n. 2, ano XVIII: 147-265.

Apesar dos efeitos da zonalidade climática ser desprezível sobre o conjunto dos materiais, podemos encontrar grandes traços regionais, que são marcados, principalmente, pela natureza dos óxidos metálicos:

- no norte do país (Amazônia) a cobertura laterítica é constituída, essencialmente, por goethita e gibbsita. A hematita, quando não está ausente, é sempre subordinada;

- na região nordeste, goethita é ainda a fase ferrífera predominante. Não ocorrem gibbsita ou hematita;

- no Brasil central, entretanto, encontramos associados nas formações lateríticas estes três óxihidróxidos metálicos: goethita, hematita e gibbsita;

- no sul, nas formações lateríticas formadas sobre rochas vulcânicas da bacia do Paraná é a goethita que desaparece, cedendo seu lugar para a hematita, que torna-se o principal constituinte ferrífero.

Estas diferenças mineralógicas refletem sobretudo variações paleoclimáticas. O clima atual pouco afetou estas formações.

A maior parte das jazidas lateríticas encontradas no Brasil estão associadas a materiais ligados à Superfície Sulamericana, se bem que em certas regiões a presença de rochas mães específicas permitem concentrações de certos elementos até limites economicamente exploráveis (jazidas minerais) ligados a materiais de cobertura da Superfície Velhas.

As lateritas friáveis da superfície inferior (Superfície Velhas) apresentam-se compartimentadas em grandes setores, que correspondem grosseiramente às bacias hidrográficas brasileiras: Amazônica, Araguaia-Tocantins, São Francisco e certas bacias de pequenos rios do sudeste.

Em cada um destes setores as lateritas apresentam características próprias no que diz respeito a proporção de argila, tipo de argila e natureza dos óxidos metálicos. Em um determinado setor, estas lateritas mais jovens se diferenciam, nitidamente, dos materiais de recobrimento da superfície mais antiga vizinha por apresentarem menos argila, gibbsitização menos desenvolvida e taxas de substituição de alumínio nos óxidos férricos mais baixas.

Finalizando esta nossa aula, gostaria de resaltar a importância que os estudos geoquímicos e microestruturais (organizações internas), considerados por alguns pesquisadores como puramente acadêmicos e teóricos, podem ter no campo da aplicação, sobretudo na geotecnia. É marcante a relação existente entre as propriedades mecânicas dos materiais e sua composição mineralógica e organização interna (estado de cristalização dos minerais secundários, sistema poral, estado físico-químico da fração argila, composição mineralógica da fração argila e arranjo microestrutural dos constituintes dos solos e das alteritas). Por isso, torna-se cada vez mais importante o estudo microscópico das lateritas (amostras indeformadas), que permite, não só, estabelecer as relações entre as fases minerais presentes e sua organização, mas também compreender porque solos e materiais superficiais que apresentam índices geotécnicos semelhantes podem, as vezes, apresentar comportamento mecânico totalmente distintos.

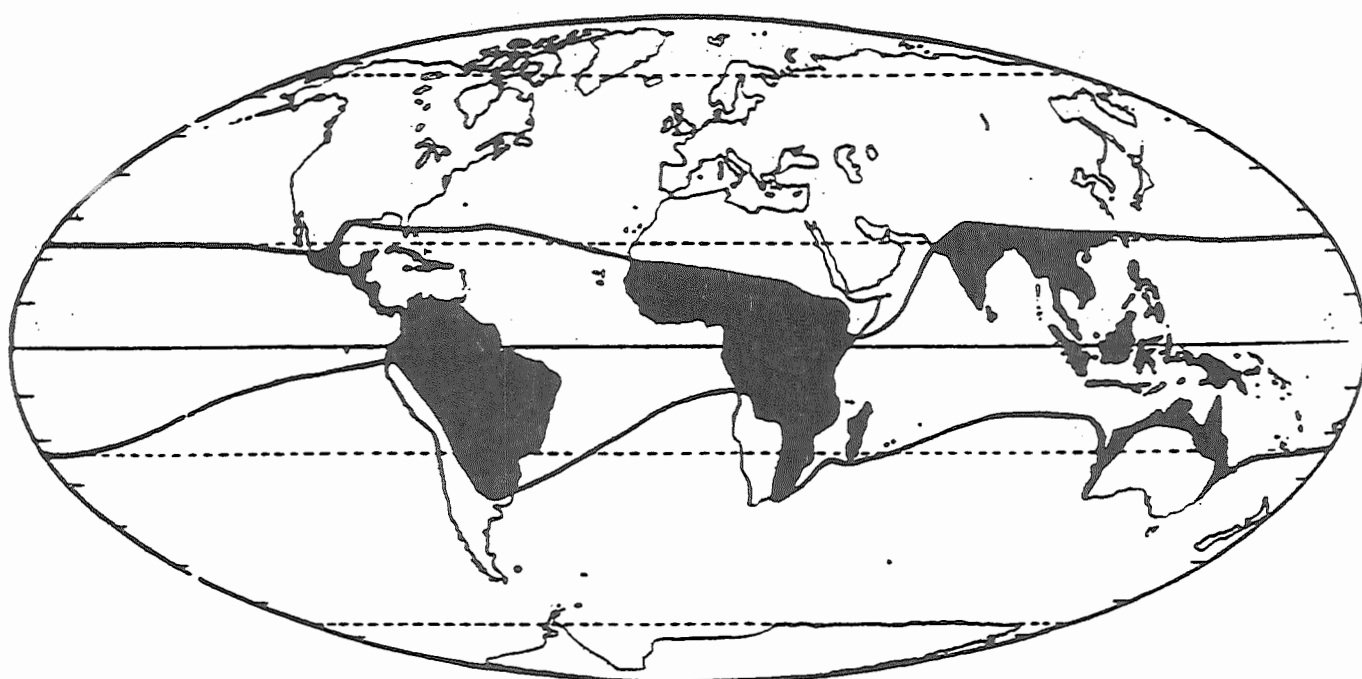


Figura 1 - Extensão do fenômeno de laterização na superfície do Globo

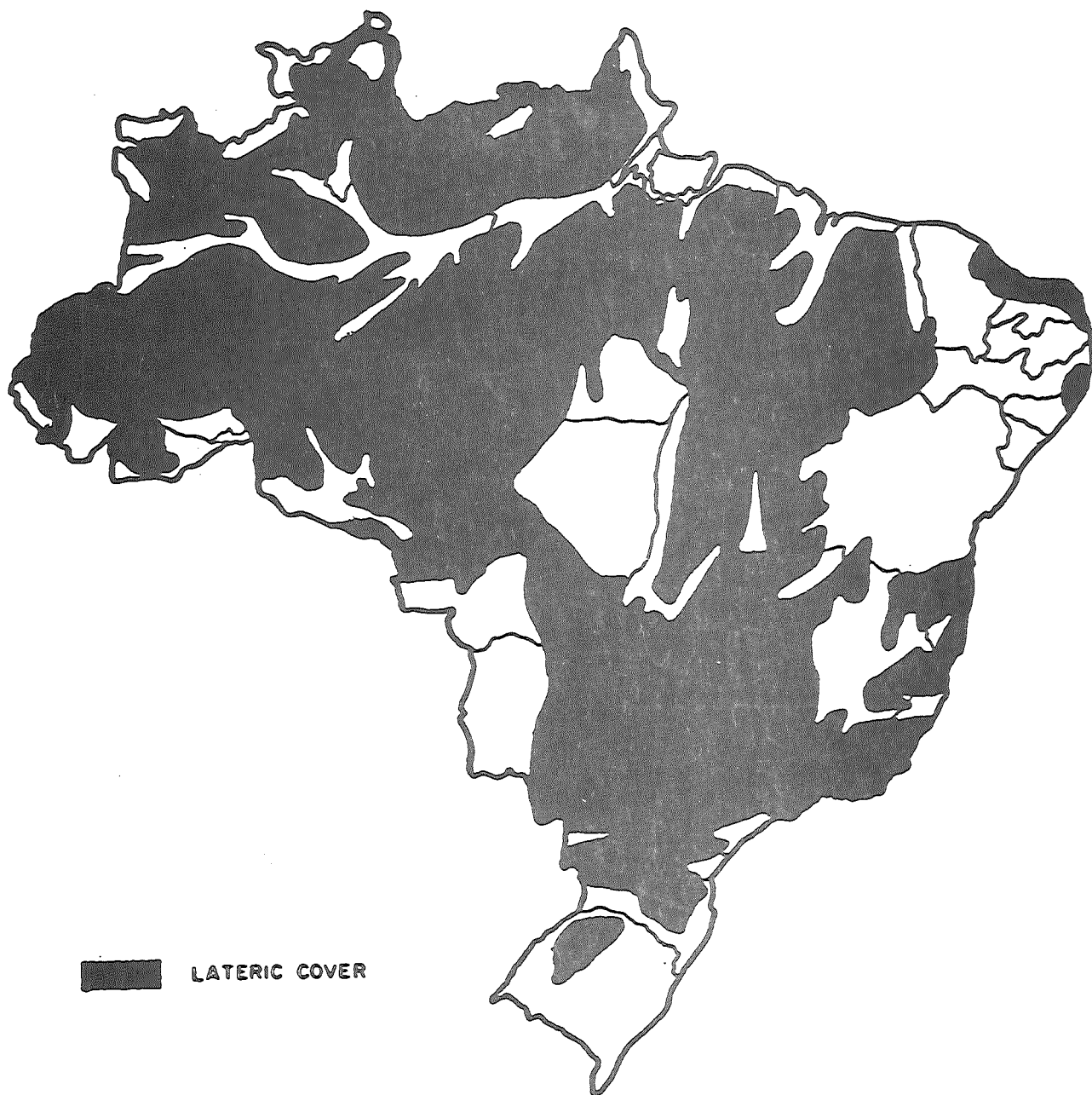
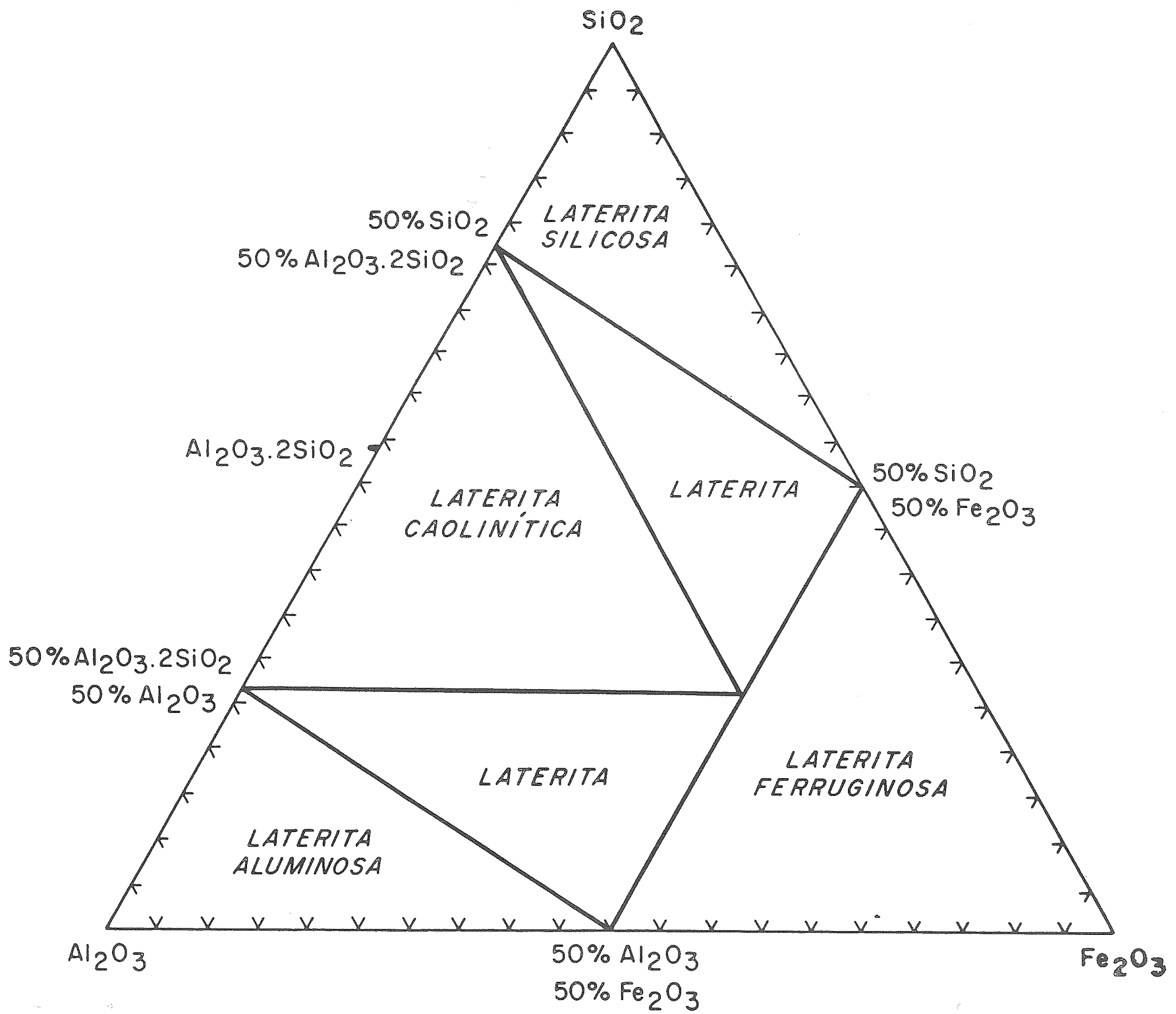


Figura 2 - Distribuição das coberturas lateríticas no Brasil

Figura 3 - Diagrama triangular de classificação das lateritas (de acordo com Schelmann, 1982)



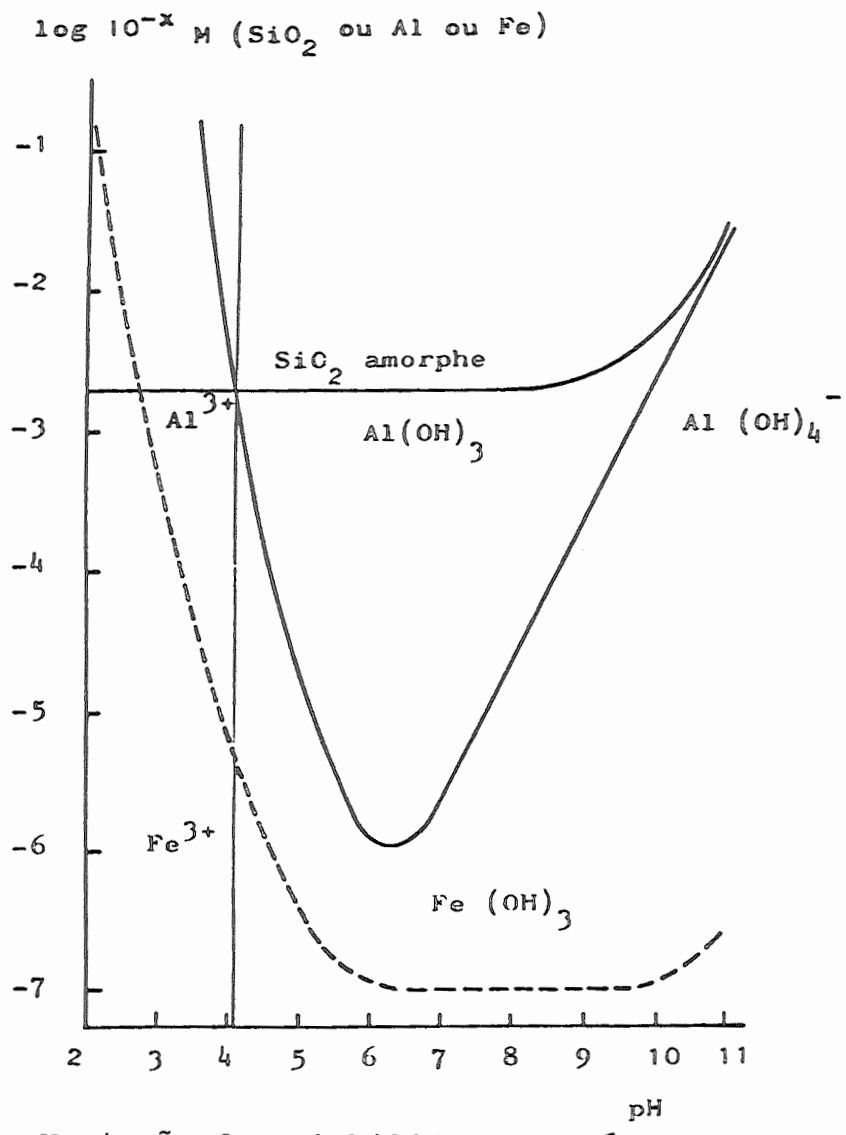


Figura 4 - Variação da solubilidade da sílica, do alumínio e do ferro em função do pH (segundo Krauskopf)

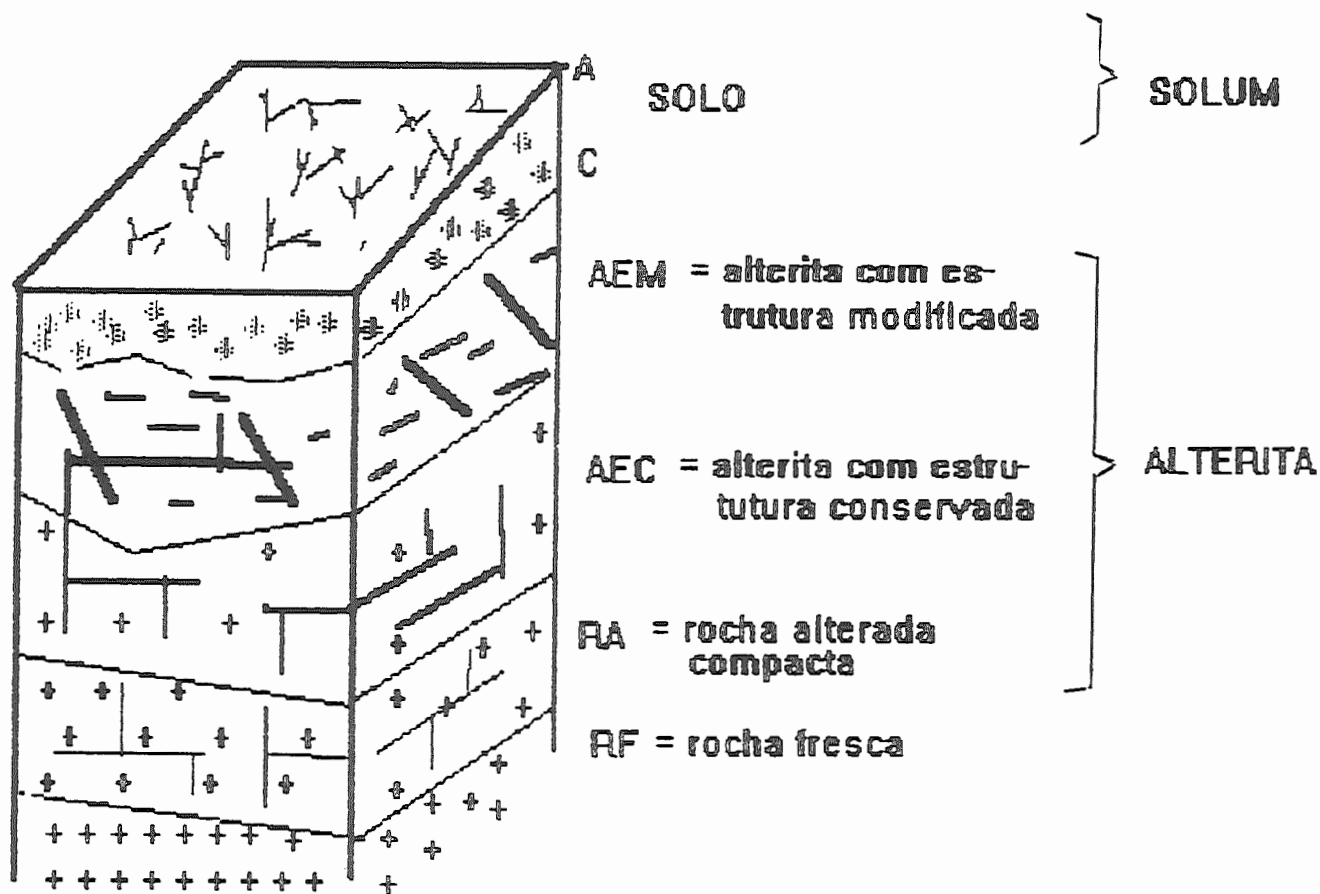
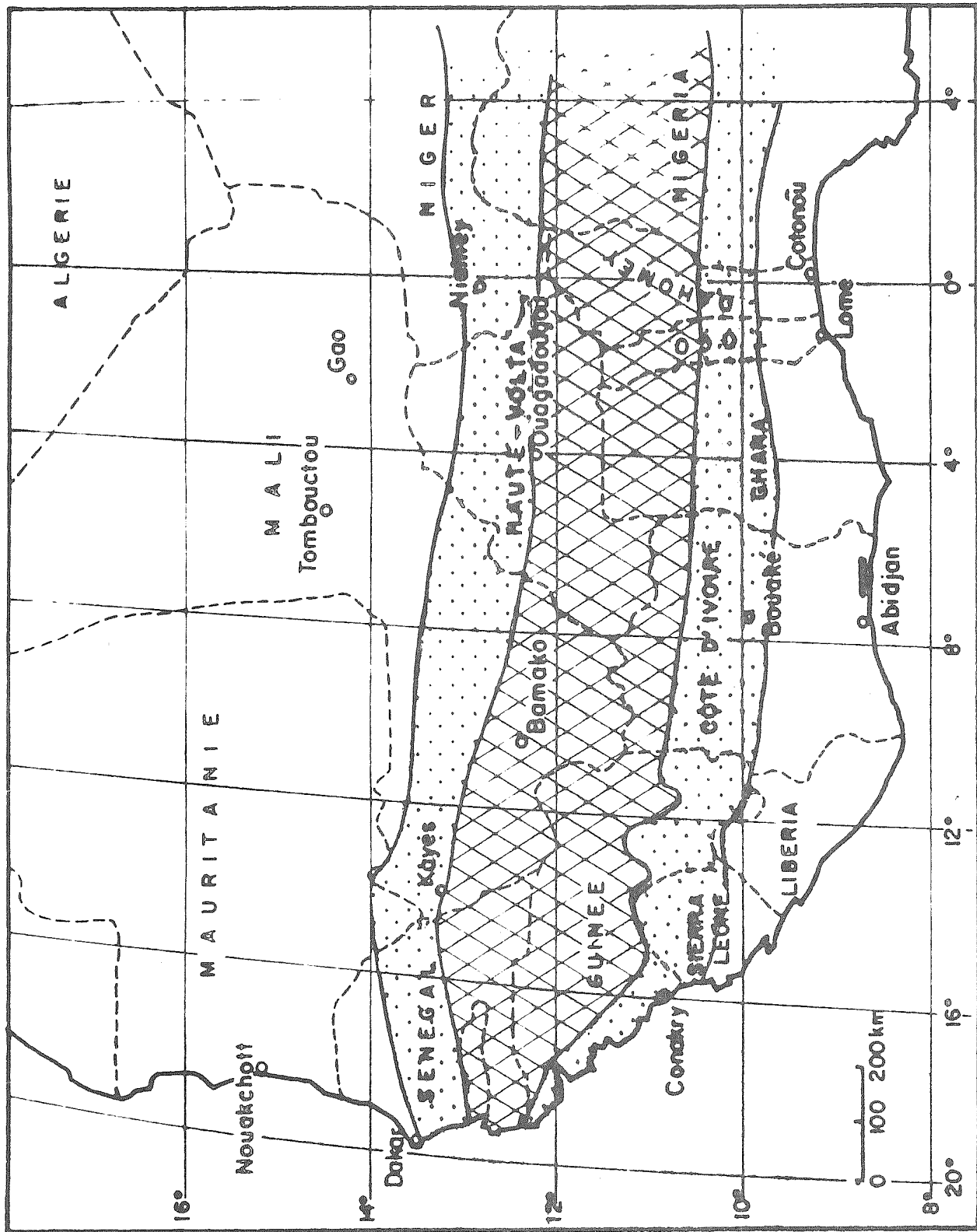


Figura 5 - Perfil esquemático de alteração das rochas em clima tropical



Zona com coureças superficiais e sub superficiais (generalizadas)
 Zona com forte concrecionamento superficial ou sub superficial

Figura 6 - Repartição esquemática das coureças e dos solos concrecionários (nódulos) na África Ocidental (segundo Maignein)