

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
CURSO DE GRADUAÇÃO A DISTÂNCIA EM  
AGRICULTURA FAMILIAR E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**



## **GÊNESE E PROPRIEDADES DO SOLO**

**1º semestre**



**PROGRAD**



Ministério  
da Educação



**Presidente da República Federativa do Brasil**

**Luiz Inácio Lula da Silva**

**Ministério da Educação**

**Fernando Haddad**

Ministro do Estado da Educação

**Ronaldo Mota**

Secretário de Educação Superior

**Carlos Eduardo Bielschowsky**

Secretário da Educação a Distância

**Universidade Federal de Santa Maria**

**Clóvis Silva Lima**

Reitor

**Felipe Martins Muller**

Vice-Reitor

**João Manoel Espina Rossés**

Chefe de Gabinete do Reitor

**Alberi Vargas**

Pró-Reitor de Administração

**José Francisco Silva Dias**

Pró-Reitor de Assuntos Estudantis

**Ailo Valmir Saccol**

Pró-Reitor de Extensão

**Jorge Luiz da Cunha**

Pró-Reitor de Graduação

**Nilza Luiza Venturini Zampieri**

Pró-Reitor de Planejamento

**Helio Leães Hey**

Pró-Reitor de Pós-Graduação e Pesquisa

**João Pillar Pacheco de Campos**

Pró-Reitor de Recursos Humanos

**Fernando Bordin da Rocha**

Diretor do CPD

**Coordenação de Educação a Distância**

**Cleuza Maria Maximino Carvalho Alonso**

Coordenadora de EaD

**Roseclea Duarte Medina**

Vice-Coodenadora de EaD

**Roberto Cassol**

Coordenador de Pólos

**José Orion Martins Ribeiro**

Gestão Financeira

**Centro de Ciências Rurais**

**Dalvan José Reinert**

Diretor do Centro de Ciências Rurais

**Ricardo Dalmolin**

Coordenador do Curso de Graduação Tecnológica em

Agricultura Familiar e Sustentabilidade a Distância

**Elaboração do Conteúdo**

**Danilo Reinheimer dos Santos**

**José Miguel Reichert**

Professores pesquisadores/conteudistas

**Equipe Multidisciplinar de Pesquisa e Desenvolvimento em Tecnologias da Informação e Comunicação Aplicadas à Educação - ETIC**

**Carlos Gustavo Matins Hoelzel**

Coordenador da Equipe Multidisciplinar

**Ana Cláudia Siluk**

Vice- Coordenadora da Equipe Multidisciplinar

### **Luciana Pellin Mielniczuk**

Coordenadora da Comissão de Revisão de Estilo

### **Ana Cláudia Siluk**

Coordenadora da Comissão de Revisão Pedagógica

### **Ceres Helena Ziegler Bevilaqua**

### **Silvia Helena Lovato do Nascimento**

Coordenadoras da Comissão de Revisão de Português

### **André Dalmazzo**

Coordenador da Comissão de Ilustração

### **Carlos Gustavo Matins Hoelzel**

Coordenador da Comissão do Design de Interface

### **Edgardo Fernandez**

### **Marcos Vinícius Bittencourt de Souza**

Coordenadores da Comissão de Desenvolvimento da Plataforma

### **Ligia Motta Reis**

Gestão Administrativa

### **Flávia Cirolini Weber**

Gestão do Design

## ETIC - Bolsistas

### Revisão de Estilo

**Bruna Porto**

**Francine Ivana Flach**

**Renata Córdova da Silva**

### Revisão Pedagógica

**Angélica Cirolini**

**Luciana Dalla Nora dos Santos**

### Revisão de Português

**Andréa Franciele Weber**

## Projeto de Ilustração

### **Ana Carina Palumbo**

Ilustrações A1 e A3

### **Bruno da Veiga Thurner**

Ilustrações C3 e D2

### **Camila Rizzatti Marqui**

Ilustrações dos Destaques de Personalidade

### **Franciani de Camargo Roos**

Ilustrações C9, C10 e D1

### **Guilherme Da Cas**

Ilustrações D3 e E6

### **Letícia Zancan Rodrigues**

Ilustrações D6, E1 e E8

### **Lucas Müller Schmidt**

Ilustrações F6 e F10

### **Ricardo Winter Bess**

Ilustrações E2 e E18

### **Sara Spolti Pazuch**

Ilustração F13

## Design de Interface

**Bruno da Veiga Thurner**

**Camila Rizzatti Marqui**

**Evandro Bertol**

**Franciani de Camargo Roos**

**Guilherme Da Cas**

**Isac Corrêa Rodrigues**

**Lucas Müller Schmidt**

## Desenvolvimento da Plataforma

**Adílson Heck**

**Cleber Righi**

**Diego Friedrich**

## Sumário

Apresentação da disciplina .....	7
UNIDADE A – Introdução à Ciência do Solo	
Introdução.....	8
Objetivos .....	8
1 – O que é solo?.....	8
1.1 – Pedosfera e solo .....	8
1.1.1 - Solo como meio de nutrição de plantas .....	9
1.1.2 - Solo como um produto de alteração das rochas.....	10
1.1.3 – Solo como um corpo natural organizado.....	10
1.2 - Solo como sistema aberto, fluxo de energia, formação do solo e relação solo-paisagem .....	11
1.2.1 – Alguns conceitos: perfil, pedon e catena .....	11
1.2.2 – Solos na paisagem.....	12
1.2.3 – Fluxo de energia e massa e formação de solos.....	13
1.3 - O solo nos geossistemas e suas funções ecológicas e produtivas.....	13
1.3.1 – Meio para o crescimento de plantas .....	13
1.3.2 – Regulação do fornecimento de água.....	14
1.3.3 – Deposição e ciclagem de resíduos .....	14
1.3.4 – Hábitat para o crescimento de organismos.....	15
1.3.5 – Medição da qualidade do solo e da água.....	15
2 - Aplicações.....	16
2.1 – Aplicação da noção de ecossistema e seus componentes.....	16
2.2 – Aplicação da noção de sistema aberto e troca energética .....	16
2.3 – Aplicação da noção de funções ecológicas do solo.....	16
3 – Atividades finais.....	17
4 - Bibliografia .....	17
4.1 - Bibliografia básica da Unidade A .....	17
4.2 - Bibliografia complementar da Unidade A.....	17
UNIDADE B – Morfologia do solo	
Introdução .....	18
Objetivos .....	18
1 – Conceitos.....	18
1.1 – Morfologia do solo .....	18
1.2 – Horizontes e camadas do perfil do solo.....	19
1.3 – Características morfológicas internas .....	21
1.3.1 - Espessura e transição entre horizontes.....	21
1.3.2 – Cor do solo.....	22
1.3.3 – Textura .....	24
1.3.4 – Estrutura .....	25
1.3.5 – Consistência.....	26
1.3.6 – Cerosidade e superfícies de fricção (slickensides).....	26
1.3.7 - Cimentação e nódulos e concreções minerais.....	27
1.3.8 – Porosidade e raízes .....	27
1.4 – Características ambientais.....	28
1.5 – Descrição do perfil do solo .....	28
2 - Aplicações.....	28
2.1 – Aplicação da cor para inferir sobre a drenagem do solo e definição de tipo de plantas a cultivar.....	28
2.2 – Aplicação da descrição morfológica para os dados sobre o uso e manejo do solo.....	28
2.3 – Aplicação do tipo de horizontes e descrição morfológica para inferir sobre processos de formação do solo .....	29
3 – Atividades finais.....	29

4 - Bibliografia.....	29
4.1 - Bibliografia básica da Unidade B .....	29
4.2 - Bibliografia complementar da Unidade B.....	30
<b>UNIDADE C - COMPOSIÇÃO DO SOLO</b>	
Introdução.....	31
Objetivos.....	31
1 – Fase sólida.....	31
1.1 – Fase sólida mineral.....	31
1.1.1 – Organização dos oxigênios em torno do silício e do alumínio.....	37
1.1.2 – Organização das unidades básicas.....	39
1.1.3 – Mineralogia da fração silte e areia.....	41
1.1.4 – Mineralogia da fração argila .....	42
1.2 – Fase sólida orgânica .....	44
2 – Fase líquida.....	47
3 – Fase gasosa.....	48
4 – Aplicação .....	49
5 – Atividades de complementação, revisão e fixação do conteúdo .....	49
6 – Bibliografia utilizada.....	50
6.1 Bibliografia básica da Unidade C .....	50
6.2 Bibliografia complementar da Unidade C.....	50
<b>UNIDADE D – Pedogênese</b>	
Introdução.....	51
Objetivos.....	51
1 – Intemperismo das rochas e formação do solo.....	51
1.1 – Definição de intemperismo .....	51
1.2 – Intemperismo físico.....	52
1.3 – Intemperismo químico.....	52
1.3.1 – Hidrólise.....	3
1.3.2 – Oxidação e redução (oxi-redução) .....	54
2 – Fatores de formação do solo.....	54
2.1 - Material de origem .....	55
2.1.1 - Material de origem orgânica.....	55
2.1.2 - Material de origem mineral .....	56
2.2 - Relevo .....	57
2.3 - Clima.....	59
2.4 - Organismos vivos .....	62
2.5 - Tempo .....	63
3 - Processos de formação do solo .....	64
3.1 – Processos gerais de formação do solo.....	64
3.2 – Processos específicos de formação do solo .....	65
3.2.1 - Latolização.....	65
3.2.2 – Podzolização, Lessivagem ou Eluviação/Iluviação.....	67
3.2.3 - Gleização.....	69
4 - Aplicações.....	70
5 – Atividades finais.....	71
6 - Bibliografia.....	72
6.1 - Bibliografia básica da Unidade D.....	72
6.2 - Bibliografia complementar da Unidade D.....	72
<b>UNIDADE E - PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO</b>	
Introdução.....	73
Objetivos.....	73
1 – Fração coloidal do solo .....	74
2 – Área superficial específica .....	76
3 – Grupos funcionais (reativos) da fração coloidal do solo.....	77
4 – Cargas elétricas .....	80

5 – Retenção de íons .....	52
5.1 – Adsorção de cátions .....	83
5.2 – Adsorção de ânions.....	87
6 – Acidez do solo.....	88
7 – Floculação e dispersão de colóides .....	94
8 – Atividade Final da Unidade E .....	95
9 – Bibliografia.....	96
9.1 Bibliografia básica da Unidade E .....	96
9.2 Bibliografia complementar da Unidade E .....	96
UNIDADE F – Propriedades físicas do solo	
Introdução.....	97
Objetivos.....	97
1 - Textura do solo.....	98
1.1 - Definições e determinação .....	98
1.2 - Relação da textura com o tipo de manejo do solo .....	99
2 - Consistência do solo.....	100
3 - Estrutura do solo.....	103
3.1 - Relações massa-volume associadas à estrutura do solo.....	104
3.2 – Agregação do solo .....	106
3.2.1 – Formação e estabilização de agregados.....	106
3.2.2 – Estabilidade de agregados .....	107
3.2.3 – Estrutura e manejo do solo .....	108
4 - Água no solo.....	109
4.1 – Propriedades fundamentais da água.....	109
4.2 – Quantidade e energia de retenção de água no solo.....	110
4.3 – Disponibilidade de água às plantas .....	113
4.4 - Movimento de água no solo.....	114
5 – Aeração do solo.....	115
6 – Temperatura do solo.....	115
7 - Limites físicos ao crescimento de plantas.....	116
8 – Aplicação: O agricultor avaliando qualidade do solo .....	120
9 – Atividades finais.....	121
10 - Bibliografia.....	122
10.1 - Bibliografia básica da Unidade F.....	122
10.2 - Bibliografia complementar da Unidade F.....	122

## Apresentação da disciplina

O solo é base dos sistemas de produção agrícola, sendo que a sustentabilidade dos agroecossistemas e do homem na Terra está intimamente ligada a esse recurso. A história apresenta alguns momentos de grande desenvolvimento e outros de decadência de civilizações estreitamente ligados ao uso ou abuso dos recursos naturais, particularmente do solo.

Esta é uma disciplina básica e fortemente conceitual, embora com esforço constante na apresentação de aplicações práticas. Os objetivos gerais da disciplina são compreender a formação do solo e prever suas características e seu comportamento; relacionar a constituição mineral e orgânica do solo com suas propriedades e seu comportamento; relacionar as propriedades e processos químicos, físicos e biológicos do solo com sua formação; e interpretar a interação destes como determinantes do comportamento do solo para uso agrícola e não agrícola.

O conteúdo programático é composto de conceitos e funções do solo, sua morfologia, com reconhecimento dos fatores e processos atuantes na sua formação, e das propriedades químicas e físicas importantes no seu uso e manejo.

As diretrizes gerais para a condução da disciplina incluem o texto base, visualização de solos e paisagens no campo e o uso do pensamento crítico e científico.

Os mecanismos de avaliação envolvem atividades intercaladas e finais, utilizando, para isso, a elaboração de tarefas a serem depositadas na plataforma do curso, a participação em atividades **simultâneas e não simultâneas** via plataforma (fórum, tarefas e *chats*) e a avaliação final presencial.

A carga horária semanal é de 5 horas (75 créditos), sendo um total de 60 h teóricas e 15 h práticas.

## UNIDADE A

### Introdução à Ciência do Solo

#### Introdução

O solo é o componente fundamental dos ecossistemas terrestres, afetando o balanço de energia, o ciclo da água, a ciclagem de nutrientes e a produtividade de cada ecossistema. Solos são corpos naturais, ocupando porções na superfície terrestre, suportando plantas e as edificações do homem e que apresentam propriedades resultantes da atuação integrada do clima e dos organismos, atuando sobre o material de origem, condicionado pelo relevo, durante um período de tempo. Além da produção de alimentos, o solo tem grande importância ecológica e ambiental. A sobrevivência do homem na Terra depende, em boa medida, da sua capacidade em harmonizar produção agrosilvopastoril com preservação ecológica e ambiental.

#### Objetivos

Os objetivos desta unidade são:

- definir pedosfera e solo além de suas interações com outras esferas;
- abordar elementos que definem o solo como sistema aberto e trocador de energia e massa;
- apresentar o solo como componente de geossistemas;
- discutir as funções gerais, ecológicas e produtivas;
- apresentar e estimular as aplicações dos conceitos apresentados.

### 1. O que é solo?

#### 1.1. Pedosfera e solo

O solo é um meio poroso, estruturado e biologicamente ativo, que se desenvolveu (e continua se desenvolvendo) na crosta da superfície terrestre. O solo pode ser imaginado como a pele que reveste o planeta Terra. A pedosfera é, portanto, o envelope da Terra, onde os solos ocorrem e sua formação é atuante.

A pedosfera somente desenvolve-se quando há uma interação en-



tre atmosfera (ar), biosfera (vida), litosfera (rochas e seus minerais) e hidrosfera (**água**). Esses cinco componentes constituem a ecosfera. Poderíamos imaginar o solo como a pele do seu corpo, que o reveste, recebe e transmite energia, interage com a atmosfera e delimita fisicamente o objeto corporal.

O reconhecimento dos solos como corpos naturais organizados, ocupando superfícies específicas no globo terrestre e com **características morfológicas, mineralógicas, químicas e físicas** relacionadas aos processos e fatores que deram origem a esses solos, ocorreu na metade do século XIX, pelo trabalho realizado por **Dokuchaev**. O conhecimento atual a respeito de solos é resultante de uma evolução de conhecimentos, com observações e registros que foram efetuados desde os primórdios da humanidade até o presente.

Os conceitos antigos serviram e ainda servem de base para o desenvolvimento de novos conhecimentos. A evolução do conceito de solo passou por diversas fases e escolas. As mais relevantes são: 1) o solo como meio de nutrição de plantas, 2) como um produto de alteração das rochas e 3) como um corpo natural organizado.

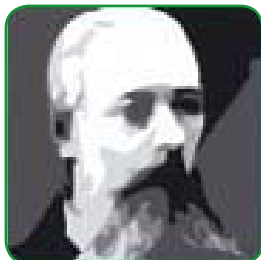
#### + SAIBA MAIS

**Água** - Na busca científica, o homem procura conhecer o ambiente de outros planetas, para saber se neles há ou houve vida nas mais variadas escalas de evolução, dentre outras curiosidades.

#### CONTEÚDO RELACIONADO

**Características morfológicas, mineralógicas, químicas e físicas** - As características morfológicas serão abordadas na Unidade B, as mineralógicas na Unidade C, as químicas na Unidade E, e as físicas na Unidade F. Os fatores e processos são partes da pedogênese (Unidade D).

#### i PERSONALIDADE



Vasily Vasilí'evich Dokuchaev (1846-1903 d.C) foi um geólogo russo, que é considerado o pai da Ciência do Solo. Antes das descobertas desse pesquisador, o solo era considerado um produto somente da transformação físico-química da rocha.

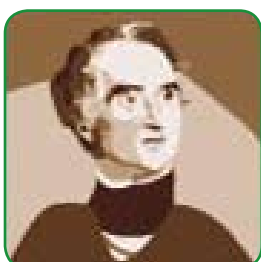
### 1.1.1. Solo como meio de nutrição de plantas

A função do solo está relacionada com a sua capacidade em nutrir as plantas. **Aristóteles** considerava o solo em relação à nutrição das plantas, ou seja, a qualificação das terras segundo sua produtividade. Os avanços dos conhecimentos de química e fisiologia vegetal levaram **Liebig** a propor, em 1843, a teoria segundo a qual as plantas necessitavam elementos minerais, que eram absorvidos juntamente com a água. Esse conceito deu origem à área de conhecimento de fertilidade do solo e nutrição de plantas.

## PERSONALIDADE



Aristóteles (384-322 a.C) foi um filósofo grego, estudante de Platão e professor de Alexandre, O Grande, e um dos mais influentes pensadores na filosofia grega antiga. Na antiguidade, os filósofos estudavam os mais distintos aspectos da natureza. Talvez você já tenha ouvido falar de Aristóteles, mas jamais imaginado que ele tivesse se preocupado com solos e nutrição de plantas.



Justus von Liebig (1803-1873 d.C) foi um químico alemão que fez inúmeras contribuições importantes na química e bioquímica agrícola. É reconhecido com o pai da fertilidade do solo pelas descobertas do nitrogênio como nutriente essencial às plantas e o estabelecimento da lei do mínimo. O seu livro mais famoso e que sintetiza o seu trabalho pode ser acessado na página da web <http://www.soilandhealth.org/01aglibrary/010159.Jenny.pdf>.

### 1.1.2. Solo como um produto de alteração das rochas

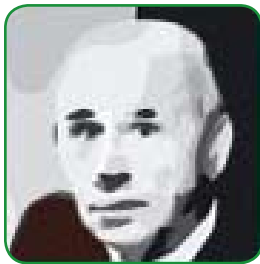
Como a Geologia foi uma ciência que se desenvolveu e foi reconhecida antes da Ciência do Solo, os primeiros estudos de gênese, classificação, mapeamento e descrição de solos foram efetuados por geólogos. Surgiram, assim, as classificações de solos como meros produtos da alteração de rochas, ou seja: solos graníticos, solos calcários, solos sedimentares recentes, entre outros.

### 1.1.3. Solo como um corpo natural organizado

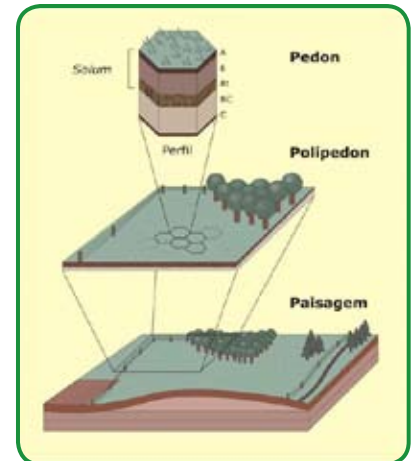
Dokuchaev observou que solos com o mesmo material de origem poderiam adquirir características diferentes devido aos fatores ambientais. Como resultado, diz que solos são produtos de interações complexas entre clima, plantas e animais, rochas, relevo e estabilidade (idade) de superfícies onde se encontram. Assim, para a formação e o desenvolvimento dos solos, é essencial a atuação do clima e dos organismos vivos sobre o material de origem, e essa formação está condicionada pelo relevo e pela estabilidade das superfícies em que o solo é encontrado (fator tempo). Com esses conceitos, desenvolveu-se uma importante área da Ciência do Solo, denominada gênese de solos ou pedogênese.

O trabalho de **Jenny** (1941), *Fatores de formação do solo* (*Factors of soil formation*), representa um clássico da literatura sobre o assunto, que deu origem ao seguinte conceito: solos são corpos naturais, ocupando porções na superfície terrestre, suportando plantas e as edificações do homem e que apresentam propriedades resultantes da atuação integrada do clima e dos organismos, atuando sobre o material de origem, condicionado pelo relevo, durante um período de tempo.

### PERSONALIDADE



Hans Jenny (1899-1990). Estabeleceu a relação matemática geral que relaciona propriedades do solo com fatores independentes de formação do solo:  $s = f(cl, o, r, mp, t, \dots)$ , onde  $s$  – propriedades do solo,  $cl$  – clima,  $o$  – organismos vivos,  $mp$  – material parental,  $t$  – tempo, ... – outras possíveis variáveis.



**Figura A.1** - Arranjo hierárquico de diferentes componentes da paisagem: pedon, polipedon, perfil e horizontes do solo. (Modificado de Brady & Weil, 1996)

## 1.2. Solo como sistema aberto, fluxo de energia, formação do solo e relação solo-paisagem

### 1.2.1. Alguns conceitos: perfil, pedon e catena

O perfil de solo (Figuras A.1 e A.2) é representado por uma superfície vertical do solo expondo os horizontes, ou seja, as camadas mais ou menos horizontais, desde a superfície da terra até o material subjacente inalterado. O perfil é usado como base para estudos de solo no campo, como a morfologia do solo, amostragem de material para análises físicas, químicas, biológicas e mineralógicas do solo.

### ATIVIDADE

**Atividade A1 e A2** - Para realizar a atividade, entre em contato com o professor da disciplina.



**Figura A.2** - Perfis de solo do estado do Rio Grande do Sul (Fotos de Streck et al., 2002)

Pedon é uma espécie de célula unitária ou a menor porção ou volume reconhecido como um solo. Um conjunto de pedons adjacentes com as mesmas características constitui o polipedon e representa a distribuição espacial de um determinado tipo ou classe de solo (Figura A.1).

### 1.2.2. Solos na paisagem

Catena é definida como uma seqüência de solos encontradas em uma sucessão na superfície terrestre, compreendida entre o interflúvio (divisor de águas) e o sistema de drenagem. Inicialmente foi concebida para superfícies de material de origem (litologia) uniforme, mas atualmente superfícies com litologias diferentes enquadram-se nessa concepção, em que a distribuição dos solos, com variação de material de origem, se torna mais complexa. A Figura A.3 apresenta uma catena típica da Depressão Central do Rio Grande do Sul. Neste momento, não se preocupe com nomes, letras e tipos de solos, pois isso nós estudaremos em detalhe nas Unidades B e D.

O estudo de seqüências de solos, em substituição ao simples perfil ou ao pedon, considerados como unidades clássicas de estudo, é importante, porque ocorrem fluxos de partículas em suspensão (argila, matéria orgânica) e em solução (**lixiviação**) de íons dissolvidos na água do solo), tanto vertical como horizontalmente, no interior e na superfície do solo. Desse modo, os solos podem ser reconhecidos e quantificados mais completamente.

Em solos profundos, encontrados normalmente em superfícies estáveis (velhas), dominam os fluxos verticais. Nas encostas, além do escoamento superficial, ocorrem fluxos subsuperficiais, os quais ocasionam transformações que vão afetar marcadamente as características dos solos.

Todos os conceitos apresentados são complementares e ainda utilizáveis. Por isso, um conceito abrangente de solo seria aquele que envolvesse todos os anteriores e outros aspectos omitidos aqui. Por exemplo, solo como um sistema aberto, complexo e vivo.

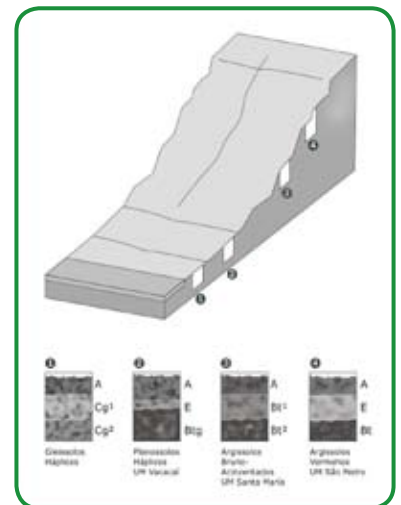


Figura A.3 - Catena da Depressão Central do Rio Grande do Sul. Fonte: Pedron et al. (2007).

### AE GLOSSÁRIO

**Lixiviação** é a remoção de materiais via solução (dissolvidos em água).

### ATIVIDADE

**Atividade A3** - Para realizar a atividade, entre em contato com o professor da disciplina.

### 1.2.3. Fluxo de energia e massa e formação de solos

O solo é um sistema aberto, que troca matéria e energia (oxigênio, gás carbônico, água, vapor, metano, outros gases) com a atmosfera. Materiais solúveis (nitrato, matéria orgânica solúvel) são lixiviados do corpo do solo. Processos físicos, químicos e biológicos no solo resultam numa distribuição desuniforme de materiais nos horizontes e solos. **Erosão**, transporte e deposição de materiais causam redistribuição de partículas na paisagem. Esses mecanismos operam numa escala de tempo de centenas, milhares ou milhões de anos.

Processos similares àqueles operam numa escala de tempo bem menor, como durante um ano agrícola. A atividade agrícola manipula fluxos de energia, dinâmicas de nutrientes e **ciclos hidrológicos** nos agroecossistemas. Grandes perturbações do solo incluem o preparo do solo, o manejo de resíduos, a fertilização, o cultivo, o controle de plantas espontâneas e a irrigação. Processos como evaporação, transpiração, decomposição de materiais orgânicos, ciclagem de nutrientes, translocações e transformações ocorrem em todos os solos. Todos esses processos afetam a estrutura ecológica e a funcionalidade dos agroecossistemas e seu entendimento contribui para o manejo mais adequado dos sistemas (Juma, 1999). Os solos sempre estarão sujeitos à ação do homem.

### 1.3. O solo nos geocossistemas e suas funções ecológicas e produtivas

Numa definição antropocêntrica (centrada no homem), a definição de ecossistema é "o homem é parte integrante do sistema que suporta a vida, sendo este composto por água, ar, minerais, solo, plantas, animais e microrganismos, todos atuando conjuntamente e mantêm o todo". Nessa definição, estão incluídas tanto as paisagens naturais quanto as construídas.

A seguir, discutiremos a importância ecológica e ambiental da pedosfera, conforme abordagem de Juma (1999).

#### 1.3.1. Meio para o crescimento de plantas

O solo sustenta fisicamente as plantas (através das suas raízes) e fornece água e **nutrientes** durante o crescimento e desenvolvimento vegetal. Os **organismos autotróficos** são capazes de realizar fotossíntese e converter gás carbônico numa diversidade de compostos orgânicos e, para isso, necessitam de nutrientes e água do solo.

#### + SAIBA MAIS

A **erosão** refere-se ao destacamento, e a deposição é o acúmulo, após serem transportadas, de partículas.

#### AE GLOSSÁRIO

**Ciclo hidrológico** ou ciclo da água é o responsável pela renovação da água no planeta e é mantido pela energia do solo e pela gravidade. Incluem-se a precipitação, a interceptação pelas plantas, a evaporação, a transpiração, o escoamento superficial e subsuperficial, a infiltração, a drenagem profunda, a ascensão capilar e a absorção pelas raízes das plantas.

#### + SAIBA MAIS

A composição mineral média para um grande número de plantas (Juma, 1999) é: nitrogênio (N), 15,2 g/kg; fósforo (P), 2,2 g/kg; potássio (K), 14,7 g/kg; cálcio (Ca), 7,7 g/kg; magnésio (Mg), 3,0 g/kg; sódio (Na), 3,7 g/kg; cloro (Cl), 7,3 g/kg; enxofre (S), 2,6 g/kg; carbono (C), 400-500 g/kg. A quantidade de nitrogênio de 15,2 g/kg significa que há 15,2 g de N por 1 kg de massa seca vegetal. Veja que isso é equivalente a 1,52% em unidades de massa.

Na maioria das plantas, o solo é a principal fonte de água, e estas absorvem-na via sistema radicular. A evolução da raiz foi certamente o evento mais importante para possibilitar o desenvolvimento de uma flora e fauna terrestre abundante. Uma vez evoluídas e presentes, as raízes provêem sustentação para plantas arbóreas e permitem íntimo contato com nutrientes e água do solo.

### 1.3.2. Regulação do fornecimento de água

A água é um recurso vital para a biosfera e para a humanidade. Embora pareça abundante, veja que apenas uma pequena fração (2,5%) é consumível pelos homens. Além disso, há uma forte competição pelo uso da água, em que competem a agricultura, a indústria e a sociedade.

Estima-se que somente 0,3 % da água doce seja, de fato, renovável. A fração renovável do ciclo hidrológico inclui os processos de precipitação, infiltração, escoamento superficial, armazenamento, transpiração e evaporação. Uma porção da água é armazenada na zona não saturada do solo e disponível às plantas. A quantidade de água no solo depende das entradas (precipitação e, quando presente, irrigação) e das saídas (escoamento superficial, percolação, evaporação e transpiração).

E como a água se move no solo e deste para a raiz da planta? O movimento ocorre em função de diferença de potencial, sendo do maior (normalmente solo mais úmido) para o menor (solo mais seco). As raízes das plantas têm um potencial mais baixo que o solo seco, e a água move-se do solo para dentro do sistema radicular.

O movimento da água no solo está associado também com a migração de argilas, matéria orgânica e **íons**, formando solos de diferentes tipos. Mais detalhes desses processos de migração serão vistos na Unidade D, que trata da gênese do solo.

### 1.3.3. Deposição e ciclagem de resíduos

O solo tem uma capacidade natural de ciclar resíduos, desde que sejam adicionados em quantidades apropriadas e em solo com condições de recebê-los. A aplicação de resíduos vegetais e de dejetos animais não deveria exceder a capacidade dos organismos do solo de degradá-los, nem permitir que excessos de elementos químicos sejam lixiviados para camadas profundas do solo ou, até mesmo, ao **aqüífero**.

Nos dias presentes, além de na agricultura, o solo tem merecido destaque nas Ciências Ambientais, particularmente nos temas de manejo de resíduos (urbanos, industriais, etc.), remediação de solos contaminados (com metais pesados, gasolina, etc.) e recuperação de terras degradadas.

#### **AE** GLOSSÁRIO

**Autotrofismo** refere-se à qualidade do ser vivo de produzir seu próprio alimento a partir de material inorgânico, por meio de fotossíntese ou quimiossíntese.

**Íon** é uma espécie química eletricamente carregada, geralmente um átomo que perdeu ou ganhou elétrons. Íons carregados negativamente são conhecidos como ânions, enquanto íons com carga positiva são denominados cátions.

**Aqüífero** é uma formação ou grupo de formações geológicas que pode armazenar água subterrânea. São rochas porosas e permeáveis, capazes de reter água e de a ceder. São utilizadas pelo homem como fonte principal de água potável, embora apenas se forem economicamente rentáveis e sem impactos ambientais negativos. Fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Aquifero>

#### **C** ATIVIDADE

**Atividade A4** - Para realizar a atividade, entre em contato com o professor da disciplina.



### 1.3.4. Hábitat para o crescimento de organismos

Solos estão repletos de vida, embora você talvez nunca tenha percebido. Isso acontece porque, via de regra, vemos apenas os organismos grandes (macrorganismos), como as minhocas. Estima-se que haja maior diversidade de espécies abaixo da superfície do solo, do que na floresta amazônica. Isso surpreende!

Solos fornecem habitat para uma grande gama de organismos, desde plantas até organismos consumidores. O solo é, de fato, um complexo micro-ecossistemas. Os organismos vivos têm um papel vital na decomposição, ciclagem de nutrientes e formação da estrutura (poros e agregados de partículas, matéria orgânica e íons).

### 1.3.5. Medição da qualidade do solo e da água

Como referido anteriormente, a estrutura de um solo é composta de poros (espaços 'vazios') e partículas de solo arranjadas em agregados (parte sólida). Os poros ocupam aproximadamente 50% do solo, podendo variar de 40 a 60% em função do tamanho das partículas (granulometria) e do manejo do solo. Os espaços vazios são ocupados por água ou ar, os quais competem entre si. Após uma chuva, o solo pode se saturar com água e expulsar todo o ar. Em solo mais seco, o ar predomina no espaço poroso.

Na respiração dos organismos vivos do solo, há liberação de gás carbônico, quando a respiração microbiana é **aeróbia**, ou de gases como metano e óxido nitroso, quando a respiração é **anaeróbia**. Esses gases podem contribuir para o efeito estufa e para a destruição da camada de ozônio. Portanto, estratégias de manejo devem ser adotadas para minimizar esses impactos ambientais.

Quando a água flui dentro do solo, ela não é pura, mas uma solução composta de íons solúveis, como nitrato, pesticidas, compostos orgânicos e microrganismos (com preocupação maior com os patogênicos, por exemplo, os coliformes fecais). Portanto, o solo afeta a qualidade da água e a do ar.

O solo tem capacidade de filtrar parte dos poluentes, mas sua capacidade é limitada.

#### **AE** GLOSSÁRIO

**Aerobiose** refere-se a um processo bioquímico que representa a forma mais eficaz de obter energia a partir de nutrientes, como a glicose (tipo de açúcar), na presença obrigatória de oxigênio. Os seres vivos que procedem à aerobiose são os seres aerobióticos. A maioria dos seres vivos encontra-se nessas condições.

**Anaeróbico** significa literalmente sem ar e se opõe a aeróbico. A presença ou ausência de oxigênio no ar afeta várias reações químicas e biológicas. As que ocorrem na ausência de oxigênio diz-se que ocorrem em anaerobiose

## 2. Aplicações

### 2.1. Aplicação da noção de ecosfera e seus componentes

Na exploração de carvão, os rejeitos são depositados na área escavada para reconstituição da paisagem. Com a cobertura desse depósito com material solo e revegetação, essas áreas eventualmente são recuperadas com neoformação de solo, ainda que muito lentamente. Nesse caso, um sistema constituído de três esferas (lito, atmo e hidrosfera) é convertido em um sistema de quatro esferas que, agora, inclui a pedosfera (novo solo formado).

### 2.2. Aplicação da noção de sistema aberto e troca energética

Terra é muito mais que solo. Ela é uma fonte de energia fluindo por um circuito de solos, plantas e animais. Cadeias alimentares são os canais vivos que conduzem energia de forma ascendente; morte e decomposição retornam a energia ao solo. O circuito não é fechado: parte da energia é dissipada (perdida) na decomposição, parte é adicionada pela absorção da atmosfera, e outra parte é armazenada nos solos, turfas e florestas (Leopold, 1966).



#### PERSONALIDADE



**Aldo Leopold** (1887-1948). Foi ecologista, florestólogo e ambientalista, sendo considerado o pai do manejo da vida silvestre nos Estados Unidos. Seu livro 'A Sand County Almanac' foi lido por milhões de pessoas, tendo estimulado o movimento ambientalista e o interesse da ecologia como ciência.

### 2.3. Aplicação da noção de funções ecológicas do solo

Um relatório das Nações Unidas sobre degradação do solo afirma que diferentes questões têm distintos 'ritmos de mudança'. Então, vejamos:

Programas populacionais levam uma geração para mostrar seus resultados. Programas de combate à poluição podem, às vezes, melhorar



a qualidade do ar e de águas superficiais em alguns anos. Contudo, a degradação do solo e o desmatamento podem ser revertidos somente após décadas de esforço continuado. Já a contaminação de águas de subsuperfície talvez nunca seja corrigida, necessitando de sistemas de purificação permanente. Assim, programas ambientais devem ter planejamento e políticas públicas de longo prazo.

### 3. Atividades Finais da Unidade

#### ATIVIDADE

**Atividade A5, A6 e A7** - Para realizar a atividade, entre em contato com o professor da disciplina.

### 4. Bibliografia

#### 4.1. Bibliografia básica da Unidade A

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **The nature and properties of soils**. 11 ed. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1996. 740p.

BUOL, S.W.; HOLE, F.D.; MCCRAKEN, R.J. **Soil genesis and classification**. Iowa, USA: The Iowa State University Press, 1973. 360p.

DEPARTAMENTO DE SOLOS. **Apostila de morfologia e gênese do solo**. Santa Maria: UFSM, sem data. 152p.

JUMA, N. **The pedosphere and its dynamics: A systems approach to soil science. V.1. Introduction to soil science and soil resources**. Edmonton, Canadá: Salman Productions, 1999. 315p.

STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C. do; SCHNEIDER, P. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Emater/RS & UFRGS, 2002. 126p.

#### 4.2. Bibliografia complementar da Unidade A

JENNY, H. **Factors of soil formation: A system of quantitative pedology**. New York, USA: Dover, 1994. 288p.

## UNIDADE B

### Morfologia do solo

#### Introdução

A descrição morfológica é empregada na identificação de solos (gênese, levantamento e classificação) e na avaliação da capacidade de uso da terra, da habilidade do solo em suportar o desenvolvimento de plantas, da capacidade de suportar obras de engenharia civil, do movimento de água e solutos no perfil, da resposta do solo ao manejo, da resistência à degradação pelos processos erosivos e de projetos ambientais. As características morfológicas aliadas às químicas e físicas permitem, também, predizer a vocação do uso do solo.

#### Objetivos

Os objetivos desta unidade são:

- apresentar características morfológicas do solo associados à sua formação;
- caracterizar morfolologicamente o solo; e
- apresentar e estimular aplicações dos conceitos discutidos.

### 1. Conceitos

#### 1.1. Morfologia do solo

A morfologia trata do estudo das formas de um corpo natural. Quando se fala em morfologia do solo, essa se refere à descrição das características do solo diagnosticadas geralmente em um perfil de solo. A morfologia do solo é avaliada através da descrição detalhada e padronizada do solo em seu meio e em condições naturais, sendo a unidade de estudo denominada perfil do solo ou pedon.

A descrição da aparência do solo no campo (perfil) é feita empregando a metodologia padronizada descrita por Lemos & Santos (1996), na qual se quantifica e/ou qualifica as características visíveis a olho nu ou perceptíveis por manipulação.

## 1.2 . Horizontes e camadas do perfil do solo

O solo apresenta uma sucessão de camadas mais ou menos paralelas à superfície com características diferenciadas entre si, que chamamos de horizontes.

No **perfil do solo** faz-se a descrição das características internas do solo, como espessura, cor, textura, estrutura, consistência, porosidade, transição e horizontes, presença de raízes e demais características, além de características ambientais do local onde ocorre o perfil.

Os horizontes pedogenéticos principais são: O ou H, A, E, B, C.

Na figura a seguir (B.1), podemos verificar a simbologia e as definições dos horizontes e/ou camadas.

Às vezes, a distinção dos horizontes não é clara, podendo existir horizontes com características intermediárias entre dois horizontes principais. Assim, têm-se os horizontes AB, EB, BC, etc, como apresentado na Figura B.2. Portanto, temos os horizontes de transição (miscigenados) entre A, E, B e C (exemplos: AB, BA, EB, BC, etc.) e os horizontes intermediários (mesclados) (**exemplos: A/B, B/A, E/B, B/C, etc.**).

Se você usar livros mais antigos, irá encontrar uma simbologia distinta e isso pode, a princípio, complicar a sua vida um pouco. Mas, basta fazer a correlação entre a simbologia antiga e a adotada presentemente, como mostrado na Figura B.3.

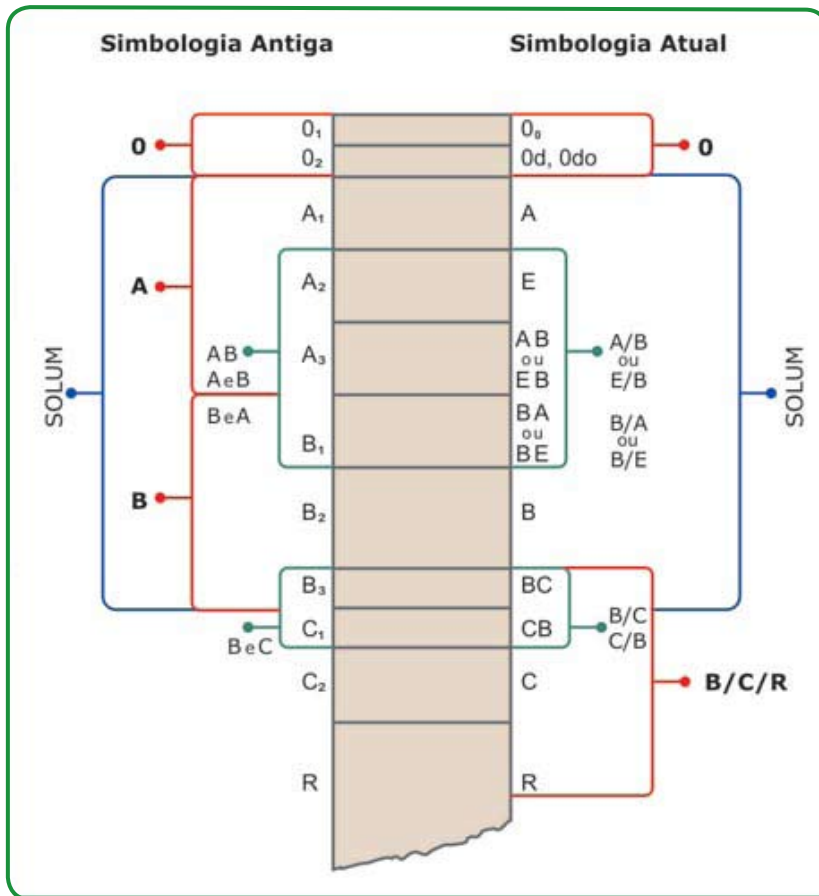
### ! ALERTA

O conceito de **perfil do solo** foi visto na unidade A. Veja que, de fato, se faz a exposição do solo da sua superfície até o material de origem e numa largura que permita vislumbrar as variações laterais. Essa exposição do perfil é feita normalmente em barrancos de estrada ou, alternativamente, em valetas ou buracos abertos para tal. Essa atividade é feita por pedólogos e, provavelmente, você será somente um usuário de informações. Na ilustração abaixo, vêem-se dois pedólogos (os professores Nestor Kämpf, à esquerda, e Egon Klamt, à direita) fazendo a exposição, toailete e identificação dos horizontes e camadas, para sua posterior caracterização morfológica, física e química.

Quando há subdivisões nos horizontes principais, usa-se a nomenclatura A1, A2, Bt1, Bt2, por exemplo. Na presença de descontinuidade litológica (formação de horizonte a partir de material de origem diferente), segue-se o exemplo seguinte: A, BA, 2B, 2CB, 3C.



**Figura B.1** - Fotos de perfis de solo, com a identificação e descrição dos horizontes principais. (Fotos de Streck et al., 2002)



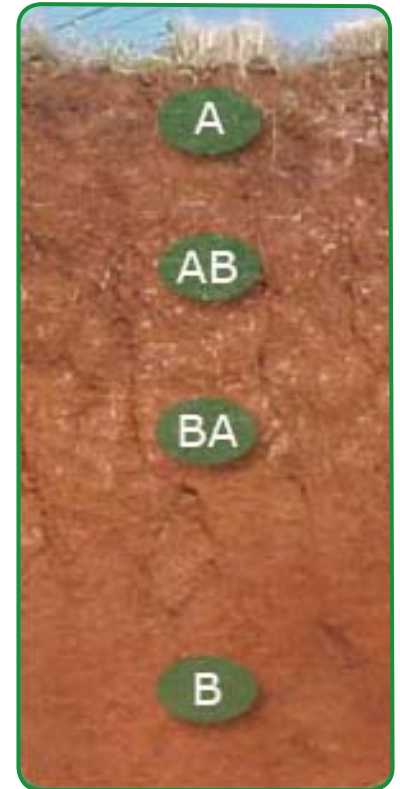
**Figura B.3** - Modificações nas designações dos horizontes principais.

Preste bastante atenção: um solo pode ter apenas um horizonte sobre a rocha ou ter inúmeros horizontes. Isso vai depender do tipo e do grau de desenvolvimento do solo, conforme será estudado na Unidade D.

Para indicar propriedades ou processos específicos, num dado horizonte, são usados sufixos.

Embora sejam muitos, é suficiente que vocês saibam os seguintes, que são os mais freqüentes em solos do Rio Grande do Sul e do Brasil:

- c** – concreções ou nódulos endurecidos (Bc);
- f** – presença de plintita (Bf, Cf);
- g** – glei (Bg, Cg);
- h** – acumulação iluvial de matéria orgânica (Bh);
- i** – desenvolvimento incipiente do horizonte B (Bi);



**Figura B.2** - Perfil de solo com horizontes principais e transicionais. Note que você já viu essa figura (Figura A.2 da Unidade A) e, possivelmente, você teve dificuldade na identificação e separação dos horizontes. Compare com a sua resposta. Fonte : Streck et al. (2002).

#### CONTEÚDO RELACIONADO

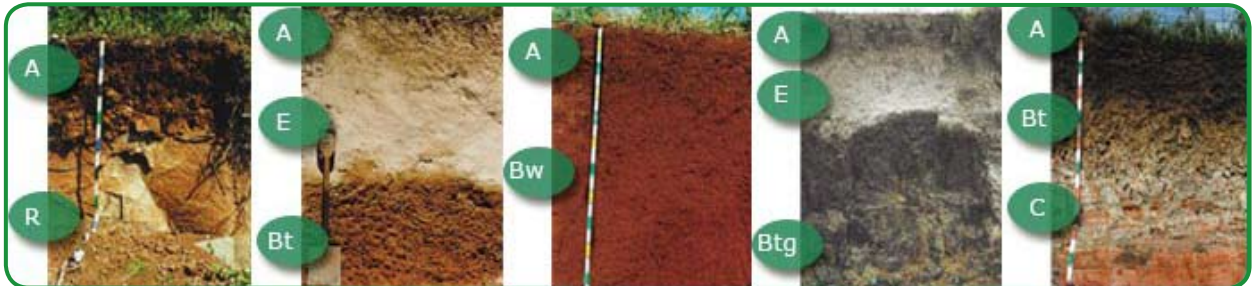
Os processos de formação do solo serão estudados na Unidade 4.

- k** – presença de carbonatos (Ck);
- n** – acumulação de sódio (Bn);
- p** – horizonte lavrado ou revolvido (Ap);
- r** – rocha branda ou saprólito (Cr);
- s** – acumulação iluvial de matéria orgânica (Bs);
- t** – acumulação iluvial de argila (Bt);
- v** – características vérticas (Bv);
- w** – intenso intemperismo do horizonte B (Bw).

A Figura B.4 mostra perfis de solo com a ocorrência de horizontes com os sufixos g, t e w.

### ATIVIDADE

**Atividade B1** - Para realizar a atividade, entre em contato com o professor da disciplina.



**Figura B.4** - Fotos de cinco perfis de solo.  
Fonte : Streck et al. (2002).

Na descrição morfológica, dois tipos de características morfológicas são analisadas: as internas ou anatômicas e as externas ou ambientais.

## 1.3. Características morfológicas internas

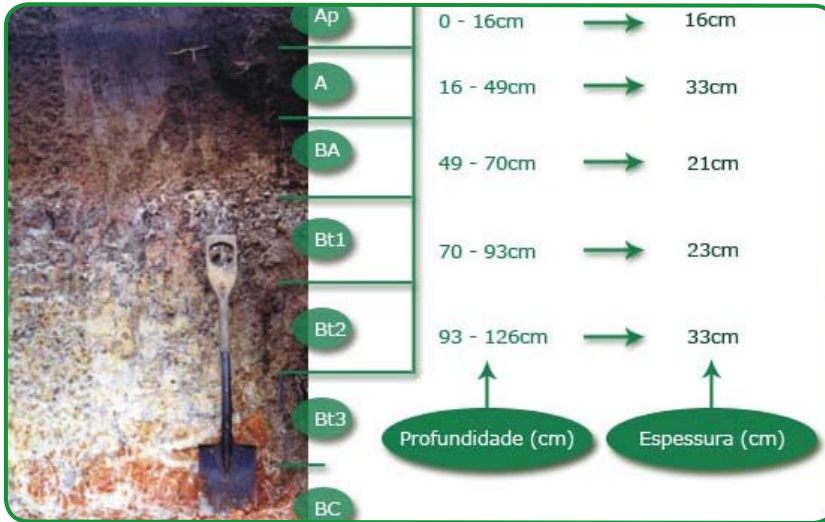
### 1.3.1. Espessura e transição entre *horizontes*

No perfil de solo da Figura B.5., foram identificados sete distintos horizontes e, posteriormente, a profundidade foi medida com uma trena e a espessura foi calculada.

### + SAIBA MAIS

Além da profundidade e espessura, determina-se também a transição (nitidez de contraste) e a forma (ou topografia) dos **horizontes**.

A transição é classificada em abrupta, clara, gradual e difusa, quando a faixa de separação for de, respectivamente, menor que 2,5cm, entre 2,5 e 7,5cm, entre 7,5 e 12,5cm e maior que 12,5cm. A forma é classificada em plana, ondulada, irregular e descontínua.



**Figura B.5** - Perfil de solo, com identificação de horizontes, com respectivas profundidades e espessuras. Fonte : Streck et al. (2002).

### 1.3.2. Cor do solo

A cor é uma característica morfológica de fácil visualização e identificação. A importância da cor do solo está ligada à inferência sobre a ocorrência de processos pedogenéticos ou à avaliação de características importantes no solo. Além disso, os sistemas de classificação de solos consideram a cor para distinção de classes. Por exemplo, no **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, fala-se em Latossolo Vermelho e Argissolo Bruno-acinzentado.

As cores do solo são a marca mais visível e importante na identificação de horizontes e processos pedogenéticos. Os principais agentes responsáveis pela cor são a matéria orgânica e os óxidos de ferro, estando relacionada a processos de drenagem, salinização, eluviação-iluviação, dentre outros (Figura B.6).

A notação da cor segue uma padronização mundial, denominada de Sistema Munsell de Cores, fazendo-se uso da carta de cores Munsell para solos, como mostrado na Figura B.7.

A cor é descrita pelo matiz, valor e croma.

**Matiz:** cor do espectro da luz, estando relacionado com o comprimento de onda de luz;

**Valor** ou tonalidade: refere-se à luminosidade relativa da cor;

**Croma:** é a pureza da cor em relação ao cinza (valor).

#### + SAIBA MAIS

Você pode saber mais sobre o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo na página web [http://www.iac.sp.gov.br/OAgro nomico/531/53108-10\\_it\\_solos.pdf](http://www.iac.sp.gov.br/OAgro%20nomico/531/53108-10_it_solos.pdf) em que estão descritas as classes de solo com as suas características.





Figura B.6 - Perfis de solo com cores distintas, relacionados a processos de formação do solo. (Fotos de Streck et al., 2002).



Figura B.7 - Escala de cores de Munsell (à esquerda), mostrando as distintas folhas (matizes) da escala; e a comparação de uma amostra de solo com a escala (à direita), indicando o valor de matiz (5Y), valor (4) e croma (3), caracterizando a cor 5Y 4/3. Perceba que essa cor tem tonalidade bem amarelada.

### 1.3.3. Textura

A textura do solo refere-se ao conteúdo percentual das frações areia (partículas maiores que 2 mm), silte (entre 2 e 0,05 mm) e argila (menor que 0,002 mm) presentes no solo. Sua determinação no campo se baseia na sensibilidade ao tato, em que a areia dá a sensação de aspereza (tipo lixa), o silte de suavidade (tipo talco ou roupa de seda) e a argila de pegajosidade (tipo barro).

Esse procedimento requer habilidade e prática. Mas não desanime! Sempre que possível, pegue um punhado de solo e umedeça-o; após, esfregue uma porção do solo umedecido para perceber as distintas sensações que as partículas nos dão. É claro que, como o solo é normalmente composto pelas três frações granulométricas (areia, silte e argila) e raramente por apenas uma delas, teremos uma ou duas sensações predominantes.

Para classificar o solo em uma **classe textural**, utiliza-se o triângulo textural, entrando com os percentuais de areia, silte e argila, e assim achando o nome da classe do solo (Figura B.8).

A textura do solo nos informa sobre facilidade de mecanização do solo, suscetibilidade à erosão, porosidade, armazenamento de água, entre outros.

**CONTEÚDO RELACIONADO**

A granulometria ou a distribuição de tamanho de partículas, por sua vez, é feita em laboratório, como veremos na Unidade F. Essas informações quantitativas são inseridas no triângulo textural para estabelecer a classe textural.

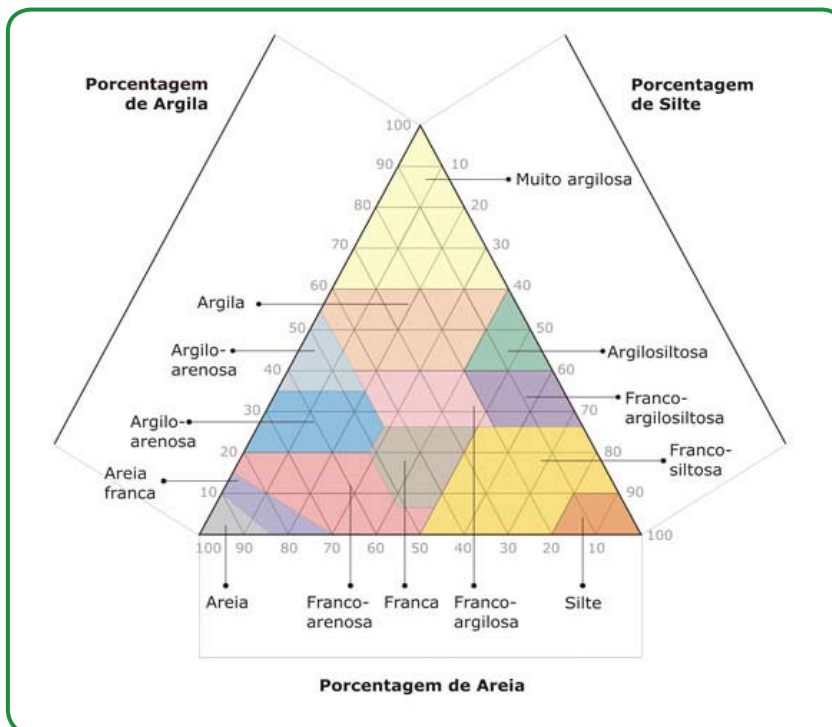


Figura B.8 - Triângulo textural com representação das classes texturais.



**ATIVIDADE**

**Atividade B2, B3 e B4** - Para realizar a atividade, entre em contato com o professor da disciplina.

**1.3.4. Estrutura**

A estrutura refere-se ao agrupamento de partículas minerais (areia, silte e argila) e matéria orgânica, em agregados ou unidades estruturais, separadas entre si pelas superfícies de fraqueza. A descrição de estrutura é feita no campo, observando-se detalhadamente os agregados, por ocasião de sua remoção no perfil.

A anotação é feita quanto ao grau de desenvolvimento, classe de tamanho e tipo de agregado. Daremos mais ênfase ao tipo de agregados e ao ambiente no qual se forma, como mostrado na Figura B.9.

Tipo de estrutura	Descrição do agregado natural (PED)	Diagrama	Exemplo de Ocorrência
Granular	Agregados pequenos, arredondados e pouco porosos, que não se ajustam entre si.		Horizonte A <sub>1</sub>
Grumosa	Agregados pequenos, arredondados e porosos, que não se ajustam entre si.		Horizonte A <sub>1</sub>
Laminar	Agregados em forma de lâminas nas quais a linha horizontal é maior que a vertical.		Horizonte E ou horizontes compactados.
Blocos angulares	Agregados em forma de cubos ajustados entre si por faces planas e arestas vivas. As três dimensões do agregado são semelhantes.		Horizonte B de alguns solos, em geral mal drenados.
Blocos subangulares	Agregados semelhantes aos blocos angulares, apresentam faces convexas ou côncavas, com vértices e arestas arredondados.		Comum em horizonte B de solos bem drenados.
Prismática	Os agregados apresentam-se sob forma de prismas, com faces planas e arestas vivas e o eixo vertical maior.		Horizonte BG de solos mal drenados.
Colunar	Os agregados apresentam-se sob forma de prismas, com as faces e vértices superiores arredondados.		Horizonte B de solos com excesso de sódio trocável.

**Figura B.9** - Tipos de estrutura (agregados) do solo e ocorrência em distintos horizontes.

A estrutura nos informa sobre a resistência à compactação, a suscetibilidade à erosão, a porosidade do solo, a infiltração de água, a permeabilidade do solo, o crescimento de raízes, dentre outros. Por exemplo, um solo com estrutura granular ou grumosa é mais poroso e permite maior infiltração de água e permeabilidade à água e ao ar, se comparado com estrutura laminar, blocos, prismática ou colunar.

### **1.3.5. Consistência**

O estado de consistência do solo é resultante das manifestações das forças físicas de coesão (solo-solo) e adesão (solo-água) entre as partículas do solo, conforme variações da umidade (teor de água) do solo.

A consistência é determinada em três estados de umidade:

- a. em solo seco, avaliando-se a dureza, estimada pela resistência do torrão seco à ruptura ou fragmentação, quando comprimido;
- b. em solo úmido, avaliando-se a friabilidade, a qual é feita quando o solo está úmido e consiste em comprimir um torrão, fragmentando-o e, posteriormente, tentar reconstruí-lo por nova compressão;
- c. em solo molhado, avaliando-se a plasticidade e a pegajosidade, em que a plasticidade refere-se à moldabilidade do solo e é feita pela formação de um fino cilindro de solo e posterior tentativa de formar um círculo com o cilindro, enquanto a pegajosidade é feita pela sensação de aderência que o solo produz entre os dedos.

A consistência do solo é afetada pela umidade, textura, tipo de argilominerais e matéria orgânica do solo.

A consistência nos dá idéia da dureza do solo, quando seco, e da plasticidade e pegajosidade, quando molhado, e também, do melhor estágio para a mecanização do solo (friabilidade).

### **1.3.6. Cerosidade e superfícies de fricção (slickensides)**

Cerosidade refere-se a um filme ou película de argila de aspecto lustroso e brilho graxo, que ocorre na superfície das unidades estruturais de horizontes subsuperficiais (Figura B.10), decorrente de material coloidal (argila ou óxido de ferro). Sua presença nos agregados do horizonte B atesta a eluviação (saída) de argila de horizontes superficiais e sua iluviação (entrada e acumulação) em horizontes subsuperficiais.

*Slickensides* são superfícies alisadas e lustrosas devido à expansão

e contração de argilominerais expansivos (Figura B.10), por processos alternados de umedecimento e secagem. Atente que essas superfícies não têm nada a ver com movimento de material coloidal dentro do perfil do solo.



**Figura B.10** - Fotos ilustrativas da presença de cerosidade (à esquerda) e slickensides (à direita). (Fotos de Streck et al., 2002).

### **1.3.7. Cimentação e nódulos e concreções minerais**

A cimentação deve-se à presença de um agente cimentante, que pode ser carbonato de cálcio, sílica ou óxidos de ferro e de alumínio. Ela confere ao solo uma constituição dura e quebradiça.

Nódulos e concreções minerais referem-se à concentração de material endurecido, com composição química variável, podendo ser de carbonato, de óxidos de manganês ou ferro e de sílica.

### **1.3.8. Porosidade e raízes**

A porosidade do solo é o volume do solo ocupado por água e ar. É muito importante para as plantas e outros organismos do solo e pode ser observada indiretamente pelo crescimento das raízes no perfil ou diretamente através da observação da existência de poros e canais no solo.

A descrição das raízes é importante, pois pode indicar algum impedimento ao crescimento destas, podendo ser de natureza química (solo ácido, presença de elementos tóxicos (Al, por exemplo) ou física (camada compactada, excesso de água ou falta de oxigênio, etc.). Também é um indicativo para a seleção de culturas pelo tamanho do seu sistema radicular.

## 1.4. Características ambientais

As características do ambiente no qual o solo está inserido são importantes para caracterizar o solo descrito dentro da paisagem onde ele ocorre, o que irá auxiliar diretamente na tomada de decisão sobre o uso agrícola do solo. Geralmente, são descritos os seguintes aspectos: localização, situação e declive, altitude, litologia (tipo de rocha ou material de origem), vegetação, atividade biológica, relevo local e regional, pedregosidade e rochosidade, erosão, drenagem, clima e uso atual.

## 1.5. Descrição do perfil do solo

A **descrição morfológica** segue a metodologia padronizada descrita em Lemos e Santos (1996). Para tanto, todas as variáveis internas e externas do solo são descritas de uma forma padronizada.

## 2. Aplicações

### 2.1. Aplicação da cor para inferir sobre a drenagem do solo e definição de tipo de plantas a cultivar

Solos em áreas de várzea possuem cores mais acinzentadas ou manchadas (mosqueados com cores avermelhadas ou amareladas) resultantes do excesso de água e da redução da presença de oxigênio. A falta de oxigênio pode caracterizar um ambiente anaeróbio, com reações químicas de redução (lembre das reações químicas em que um elemento químico recebe elétrons e é reduzido). Um dos elementos mais afetados pela redução é o ferro. Este, em condições de anaerobiose por longo tempo, pode sair completamente do perfil, deixando o solo com cor acinzentada. Quando há épocas de redução e outras de oxidação, o solo fica com mosqueados. Se o solo é sempre bem aerado, as cores são vermelhas. Com base nisso, podemos dizer que a cor é a 'marca do Zorro', que expressa a possibilidade de usarmos o solo para culturas distintas em função das exigências destas quanto à aeração no solo.

### 2.2. Aplicação da descrição morfológica para os dados sobre o uso e manejo do solo

O tipo, a seqüência e a espessura de horizontes informam-nos sobre a profundidade efetiva de exploração pelas raízes das plantas. A

#### ! ALERTA

É pouco provável que vocês venham a fazer uma descrição morfológica completa na sua vida profissional. Contudo, a visualização do perfil em barrancos ou valetas com um olhar educado, após a apropriação (internalização) dos conceitos e interpretações apresentados anteriormente, permitirá fazer uma série de inferências (origem do solo, condições de evolução, limitações ao uso, vocação de uso) úteis para a agricultura familiar e para o uso mais sustentável de agroecossistemas.

Outra utilidade ainda mais freqüente será o uso de descrições morfológicas feitas para solos de sua região e, a partir destas, a extração de informações para fazer as inferências mencionadas no parágrafo anterior. Essa estratégia será praticada posteriormente.

textura ajuda a caracterizar a susceptibilidade à erosão, retenção de nutrientes e drenagem do solo. A estrutura do solo permite inferir (isto é, tirar conclusões) sobre a sua permeabilidade e resistência à erosão e à compactação. A consistência auxilia na tomada de decisão sobre o preparo do solo ou sobre a realização de outras atividades em distintas condições de umidade. As características ambientais contribuem com informações complementares, como aquelas importantes na adoção de mecanização (pedregosidade, declive e relevo) e na identificação da erosão do solo (marcas de erosão já existentes: sulcos ou voçorocas, por exemplo, ou declive e relevo).

### **2.3. Aplicação do tipo de horizontes e descrição morfológica para inferir sobre processos de formação do solo**

O incremento acentuado do teor de argila de um horizonte para o outro, associado a cores acinzentadas, caracteriza um horizonte Btg. Assim, nesse solo, houve migração de argilas e forte redução, devido à condição de anaerobiose. Outrossim, podemos dizer que esse solo seria adequado, possivelmente, para o cultivo de arroz irrigado por inundaçã, já que a drenagem dentro do perfil seria lenta.

## **3. Atividades finais**

### **ATIVIDADE**

**Atividade B5, B6, B7 e B8** - Para realizar a atividade, entre em contato com o professor da disciplina.

## **4. Bibliografia**

### **4.1. Bibliografia básica da Unidade B**

BRASIL, Ministério da Agricultura. Divisão de Pesquisas Pedológicas. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Rio Grande do Sul**. Recife: EMBRAPA, 1973. 431 p. (Boletim Técnico N° 30)

BUOL, S.W.; HOLE, F.D.; MCCRAKEN, R.J. **Soil genesis and classification**. Iowa, USA: The Iowa State University Press, 1973. 360p.

DEPARTAMENTO DE SOLOS. **Apostila de morfologia e gênese do solo**. Santa Maria: UFSM, sem data. 152p.

JUMA, N. **The pedosphere and its dynamics: A systems approach to soil science. V.1. Introduction to soil science and soil resources.** Edmonton, Canadá: Salman Productions, 1999.315p.

LEMOS, R. C. de; SANTOS, R. D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo.** 4<sup>a</sup>. ed. Viçosa: SBCS, 2002. 83 p.

PEDRON, F.A.; AZEVEDO, A.C. de; DALMOLIN, R.S.D.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. **Principais solos da região da Quarta Colônia, Rio Grande do Sul: guia de excursão.** Santa Maria: Departamento de Solos, UFSM, 2007. 41p.

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; DALMOLIN, R.S.D.; AZEVEDO, A.C. de; PEDRON, F.A. **Principais solos da Depressão Central e Campanha do Rio Grande do Sul: guia de excursão.** 2<sup>a</sup>. ed. Santa Maria: Departamento de Solos-UFSM, 2007. 47p.

STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C. do; SCHNEIDER, P. **Solos do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre: Emater/RS & UFRGS, 2002. 126p.

#### **4.2. Bibliografia complementar da Unidade B**

BRADY, N.C., WEIL, R.R. **The nature and properties of soils.** 11 ed. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1996. 740p.

## UNIDADE C

### Composição do solo

#### Introdução

A Terra existe há aproximadamente 4 bilhões de anos. O solo pode ser considerado um ser vivo. Como todo ser vivo, o solo tem um corpo bem definido. Nesse corpo, encontramos uma base sólida, uma fase líquida e uma fase gasosa. Enquanto no corpo humano a fase sólida é composta de ossos, proteínas, gorduras, entre outras; no solo, a fase sólida é composta de minerais e matéria orgânica. No corpo humano, a fase líquida é composta de água e sangue, que contêm todas as substâncias e íons necessários à manutenção da parte sólida viva. No solo, a fase líquida também é a água, que está armazenada nos espaços vazios da fase sólida e é de onde as plantas e os microorganismos absorvem os nutrientes necessários ao seu desenvolvimento. No corpo humano, a fase gasosa interna está em contato direto com todos os gases existentes na atmosfera da Terra. É através desse contato que efetuamos a troca de um ar carregado de  $\text{CO}_2$  por outro mais rico em oxigênio. No solo, a fase gasosa preenche os espaços vazios deixados pela fase sólida e que não estão ocupados pela fase líquida. Como no solo há muita vida, consideramos que o solo respira e troca gases com a atmosfera, exatamente como o ser humano faz.

#### Objetivos

Os objetivos desta unidade são:

- elucidar como as fases do solo se organizam;
- apresentar os principais constituintes de cada fase do solo;
- alertar para o fato de o Homem poder modificar a organização e os constituintes de cada fase do solo; e
- perceber o solo como um corpo vivo no seu dia-a-dia.

### 1. Fase sólida

#### 1.1. Fase sólida mineral



A fase sólida do solo é constituída por material orgânico e mineral. O material mineral do solo é originado dos minerais das rochas alterados ou não, apresentando estrutura cristalina, que é a repetição de uma seqüência de átomos na estrutura da matéria. Quando não existe essa repetitividade, a estrutura dos minerais é chamada de amorfa. Já os materiais orgânicos são componentes orgânicos provenientes da decomposição de restos vegetais e animais pelos microorganismos do solo.



**Figura C.1** - Rochas vulcânicas (granito e basalto) que formarão os principais solos ocorrentes no Rio Grande do Sul



**Figura C.2** - Materiais de origem dos solos



A fase mineral é formada a partir da fragmentação ou desmonte das rochas por ação do **intemperismo**. A simples fragmentação das rochas produz os chamados minerais primários do solo. No Rio Grande do Sul, nós podemos observar vários tipos de rochas e, conseqüentemente, teremos vários tipos de minerais primários. As três principais rochas (materiais de origem) são (Figuras C.1. e C.2):

a. Basalto, que recobre toda a metade norte do estado. O basalto é uma rocha de origem vulcânica que se resfriou rapidamente, fazendo com que o tamanho dos minerais seja muito pequeno: 'não deu tempo para eles se agruparem em minerais maiores'. Os minerais primários, aqueles já existentes na rocha, são ricos em ferro, cálcio e magnésio. Se você mora em cidades do Planto, como Tio Hugo, Tapejara, Constantina, Três de Maio e Cerro Largo (Figura C.3), você encontrará essa rocha nos calçamentos das ruas e nos muros das casas. Também a maioria dos cascalhos e das britas usadas na construção civil e em aterros de estradas são rochas basálticas moídas. A intemperização do basalto é extremamente lenta e originará solos ricos em partículas finas (argila). Na fração argila desses solos, nós encontraremos altos teores de ferro, os quais impregnarão sua cor característica ao solo. Quando o solo formado pelo basalto for bem drenado (perde facilmente a água quando chove), será avermelhado (Figura C.4). Quando ele se localizar em lugares mais úmidos, será amarelado. Solos amarelados podem ser encontrados facilmente na região de Vacaria.

**+ SAIBA MAIS**

**Intemperismo** é um conjunto de fenômenos físicos e químicos que levam à transformação dos minerais e, portanto, das rochas. O termo intemperismo é aplicado às alterações físicas e químicas a que estão sujeitas as rochas na superfície da Terra, porém, essa alteração ocorre 'in situ', ou seja, sem deslocamento do material (<http://pt.wikipedia.org/wiki/Intemperismo>). Esse tema será tratado em maior detalhe na Unidade 4.



**Figura C.3** - Distribuição dos principais materiais de origem (rochas) ocorrentes no Estado do Rio Grande do Sul



**Figura C.4** - Solo originário de basalto em ambiente bem drenado (Fonte: Pedron et al., 2007).

**b.** Granito, que pode ser encontrado abundantemente no Escudo Sul-Riograndense. O granito é também uma rocha de origem vulcânica, mas que se resfriou lentamente (no interior da Terra), fazendo com que o tamanho dos minerais seja grande: 'deu tempo para os minerais se agruparem em minerais maiores'. Os minerais primários, aqueles já existentes na rocha, são pobres em ferro e magnésio e ricos em silício. Se você mora em cidades como Canguçu, Porto Alegre, Pelotas e Santa Maria você encontrará essa rocha nos calçamentos das ruas e nos muros das casas. A intemperização do granito é também extremamente lenta e originará solos pobres em argila. A fração predominante será a areia. O solo tem aspecto grosseiro e bem drenado. Ele tem baixa capacidade de reter água. Por ter pouca argila, esses solos são de coloração mais clara e acinzentada (cor da matéria orgânica e dos silicatos).

**c.** Materiais arenoquartzosos (arenitos, coberturas superficiais arenosas) são comuns na Costa Litorânea, Depressão Central e Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul. Esses materiais primários, em qualquer condição climática, originarão solos de textura arenosa. Serão solos porosos, com pequena capacidade de armazenamento de água e baixíssima fertilida-

de natural.

Independentemente do tipo de rocha, as matérias sólidas dos solos são classificadas, em função de seu tamanho, em (Figura C.5):

Material Sólido	Diâmetro (mm)
Matação	>200
Calhau	200-20
Cascalho	20-2
Areia Grossa	2-0,20
Areia Fina	0,20-0,05
Silte	0,05-0,002
Argila	<0,002

**Figura C.5** - Classificação dos materiais ocorrentes no solo em função do diâmetro

Para fins agrícolas, porém, as partículas mais importantes são aquelas que estão em classes menores que a areia. As partículas do solo com grande área superficial em relação a sua massa são chamadas **colóides** e têm um tamanho inferior a 1 micra, ou 1 milésimo de milímetro. A área por unidade de massa é chamada de área superficial específica (ASE), como pode ser visto na Figura C.6.

Aresta (mm)	Área específica (m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	Número de partículas (n <sup>o</sup> g <sup>-1</sup> )
2	0,001	4,7x10
1	0,002	3,8x10 <sup>2</sup>
0,5	0,005	3,1x10 <sup>3</sup>
0,25	0,009	2,4x10 <sup>4</sup>
0,10	0,023	3,8x10 <sup>6</sup>
0,05	0,045	3,0x10 <sup>7</sup>
0,002	1,132	4,7x10 <sup>10</sup>
0,001	2,264	3,8x10 <sup>11</sup>

**Figura C.6** - Área superficial específica em função do tamanho da aresta de um cubo

#### **+ SAIBA MAIS**

Em química, colóides (ou sistemas coloidais), são, na verdade, misturas heterogêneas, em que o diâmetro médio das partículas do disperso se encontra na faixa de 10 a 1000 angstroms. A dispersão coloidal é impropriamente denominada colóide. As partículas do disperso podem ser bolhas de gás, gotas líquidas ou partículas sólidas. Podem ser diferenciadas de partículas, numa solução ou em suspensão, por seu tamanho (<http://pt.wikipedia.org/wiki/Col%C3%B3ide>)

#### **ATIVIDADE**

**Atividade C1** - Para realizar a atividade, entre em contato com o professor da disciplina.

A ação dos agentes físicos, químicos e biológicos sobre os materiais primários (rochas) libera:

- a. minerais primários (feldspatos, horblendas, gesso, dolomita, etc);
- b. grupos de íons (tetraedros, octaedros, fosfatos, sulfatos, etc.) e
- c. íons de elementos químicos ( $\text{Si}^{+4}$ ,  $\text{Al}^{+3}$ ,  $\text{Fe}^{+2,+3}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ , ...).

Os grupos de íons e os íons isolados podem se remontar através de interações químicas, formando novos minerais, denominados minerais secundários do solo. Em função da riqueza em oxigênio, os minerais secundários (assim como já eram os minerais primários) e, por consequência, o solo podem ser considerados um **mar de oxigênios** (89,8% do volume). Dentre os cátions (elementos positivos), predominam silício ( $\text{Si}^{+4}$ ), alumínio ( $\text{Al}^{+3}$ ) e ferro ( $\text{Fe}^{+2}$ ) (Tabela C.3).

Íon	Massa (%)	Volume (%)
$\text{O}_2^-$	46,7	89,8
$\text{Si}^{+4}$	27,7	2,4
$\text{Al}^{+3}$	8,1	1,2
$\text{Fe}^{+2}$	5,1	0,8

**Figura C.7** - Massa e volume dos principais elementos químicos presentes nos minerais do solo.

Em primeiro lugar, você deverá saber como os átomos de oxigênio se organizam em torno do  $\text{Si}^{+4}$  e  $\text{Al}^{+3}$ , formando unidades básicas para a construção do solo. Essas unidades básicas podem ser facilmente comparadas aos tijolos usados na construção civil. Nós podemos ter diferentes tijolos (maciço, 4 furos, 6 furos, tijolos de barro e palha). Em seguida, você poderá entender como essas unidades básicas podem ser combinadas para formar diferentes minerais secundários. Similarmente, você pode construir uma bela casa ou uma horrível pocilga com o mesmo tijolo. Você pode construir a mesma casa com dois tijolos diferentes de forma combinada, até para que possa dar mais resistência à construção. Por exemplo, você pode construir o alicerce com tijolos maciços, e as paredes com tijolos de 6 furos. No solo, temos algo similar.

Nós teremos *minerais diferentes*, porque foram construídos por *unidades básicas diferentes*, mas também poderemos ter *minerais diferentes*, porque foram *empilhadas* as mesmas unidades básicas, mas *de forma diferente*.

Conhecendo como é a organização dessas unidades básicas, você conhecerá o 'segredo do solo'.

### 1.1.1. Organização dos oxigênios em torno do silício e do alumínio

A organização dos átomos de oxigênio em torno de um átomo catiônico central deve respeitar algumas regras, tais como:

- a. átomos na forma de íons são esferas sólidas com raio constante;
- b. o raio do ânion ( $O^{2-} = 0,14 \text{ nm}$ ) é maior do que o raio do cátion ( $Si^{+4} = 0,042 \text{ nm}$ ;  $Al^{+3} = \text{nm}$ ;  $Fe^{+2} = \text{nm}$ ;  $Mg^{+2} = 0,056 \text{ nm}$ );
- c. o arrançamento deverá minimizar o **potencial eletrostático** (sobra de cargas);
- d. o arrançamento será o mais compacto possível;
- e. o ânion ( $O^{2-}$ ) é coordenado por um cátion central ( $Si^{+4}$ ;  $Al^{+3}$ ;  $Fe^{+2}$ ;  $Mg^{+2}$ ), contendo um número máximo de ânions e todos ligados ao cátion central.

A relação entre o raio do cátion e o raio do oxigênio (Figura C.5) define o número de coordenação do cátion. Assim, se a relação for menor do 0,414, se formará um tetraedro, e se a relação estiver entre 0,414 e 0,732, somente será possível formar um octaedro. Em função dessa regra, o silício somente formará tetraedros (relação de raios de  $0,3 - 0,042/0,14$ ). O ferro, o manganês, o magnésio e o cálcio formarão sempre octaedros. O alumínio, por apresentar uma relação próxima de 0,414, geralmente, forma octaedros, mas pode facilmente formar tetraedros também.

#### + SAIBA MAIS

Potencial elétrico é a capacidade que um corpo energizado tem de realizar trabalho, ou seja, atrair ou repelir outras cargas elétricas. Com relação a um campo elétrico, interessa-nos a capacidade de realizar trabalho, associada ao campo em si, independentemente do valor da carga  $q$  colocada num ponto desse campo. Para medir essa capacidade, utiliza-se a grandeza *potencial elétrico*. Para obter o potencial elétrico de um ponto, coloca-se nele uma carga de prova  $q$  e mede-se a energia potencial adquirida por ela. Essa energia potencial é proporcional ao valor de  $q$ . Portanto, o quociente entre a energia potencial e a carga é constante. Esse quociente chama-se *potencial elétrico do ponto*. ([http://pt.wikipedia.org/wiki/Potencial\\_el%C3%A9trico](http://pt.wikipedia.org/wiki/Potencial_el%C3%A9trico))



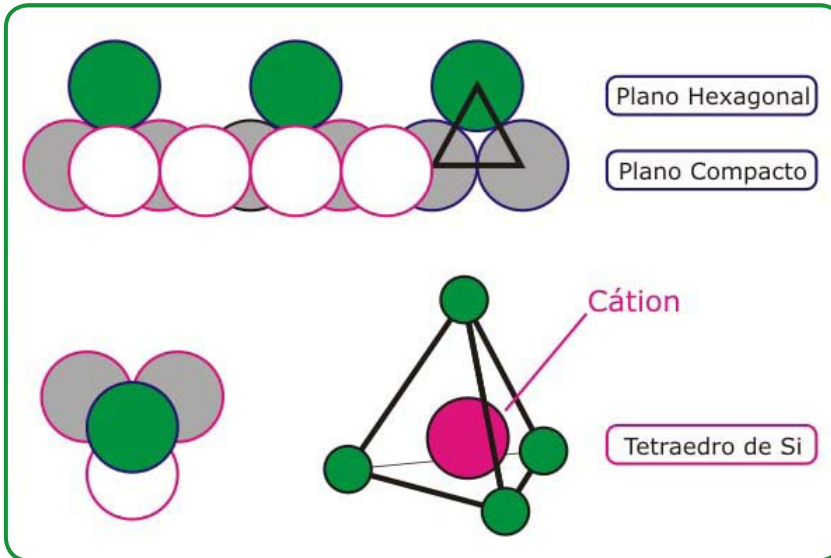
R(Å)		
Oxigênio	1.35	Tetraedros (x~0,225)
Silício	0.26	
Aluminio Te	0.39	
Aluminio Oc	0.53	
Magnésio	0.66	Octaedros (0,414 - 0,732)
Fe <sup>II</sup>	0.75	
Fe <sup>III</sup>	0.64	
K	1.33	Adsorvidos
Na (nH <sub>2</sub> O)	0.90	
Li	0.68	
Ca (nH <sub>2</sub> O)	0.99	
Mg (nH <sub>2</sub> O)	0.65	
NH <sub>4</sub>	1.44	

**Figura C.8** - Raio do oxigênio e dos principais cátions encontrados nos tetraedros e octaedros dos minerais do solo.

Para montar um tetraedro, imagine que você tenha uma caixa de vidro. Coloque no fundo dessa caixa uma camada de bolas de sinuca. Olhando de cima, o que você vê? Buracos, formados pelas três bolas vizinhas. Essas bolas correspondem aos oxigênios. Em seguida, preencha esses buracos com bolinhas de gude. As bolinhas de gude representam o silício. Para finalizar o tetraedro, coloque uma nova camada de bolas de sinuca. Como ficará essa nova camada de bolas? Somente há uma possibilidade: uma bola se encaixará sobre as três bolas da camada de baixo, deixando, no interior, a bolinha de gude.

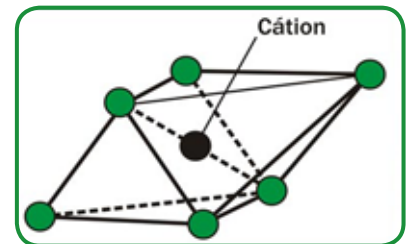
Desse modo, a bolinha de gude (silício no caso dos minerais do solo) ficará em contato com quatro bolas de sinuca (oxigênio no caso dos minerais do solo), formando a nossa primeira unidade básica (**tijolo químico**). Cada oxigênio fará uma ligação com o silício. Como o silício tem 4 cargas positivas, ele ficará neutralizado. Como cada átomo de oxigênio tem duas cargas negativas (veja numa tabela periódica), ele ficará ainda com uma carga negativa livre (Figura C.6). Essa carga negativa livre possibilitará que os tetraedros se liguem entre si ou mesmo

que um tetraedro se ligue a um octaedro, como veremos adiante.



**Figura C.9** - Disposição dos átomos de oxigênio e silício num tetraedro e união dos tetraedros para formar uma lâmina tetraedral.

Quando o cátion central for um íon com raio maior, não é possível aproximar os oxigênios, assim como no tetraedro (a bolinha de gude é grande e não cabe no meio das bolas de sinuca). Desse modo, o arranjo se fará com seis (6) íons de oxigênio. Como organizar 6 oxigênios em torno de um cátion central (Al, Fe, Mn, Mg ou Ca)? Colocam-se 4 oxigênios num plano (sobre a placa de vidro, por exemplo), um oxigênio em cima e um oxigênio em baixo da placa. A figura formada é um octaedro e é a nossa segunda unidade básica em mineralogia (Figura C.7). No caso do  $Al^{+3}$ , cada íon de oxigênio se ligará com meia carga ao  $Al^{+3}$  central, o que ficará neutralizado (6 íons x 0,5 carga = 3 cargas). Os oxigênios do octaedro ficarão ainda com carga negativa residual, para que possam reagir com o próton ( $H^+$ ) e com outros octaedros e tetraedros.



**Figura C.10** - Octaedro de alumínio ou ferro

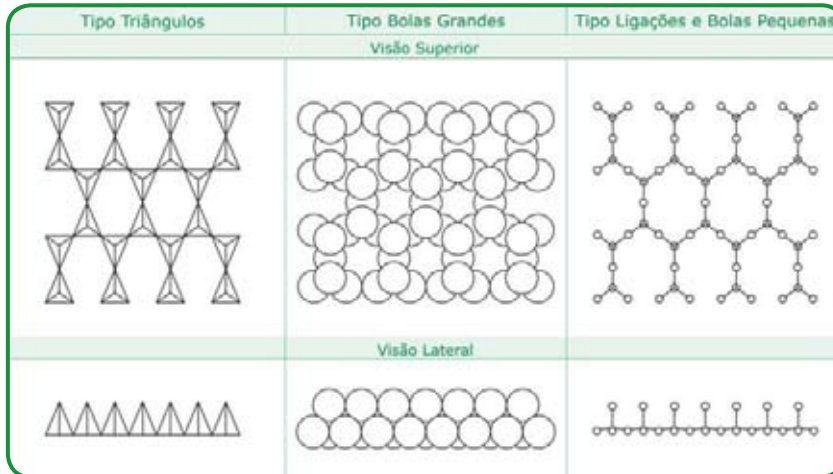
## ATIVIDADE

**Atividade C2** - Para realizar a atividade, entre em contato com o professor da disciplina.

### 1.1.2. Organização das unidades básicas

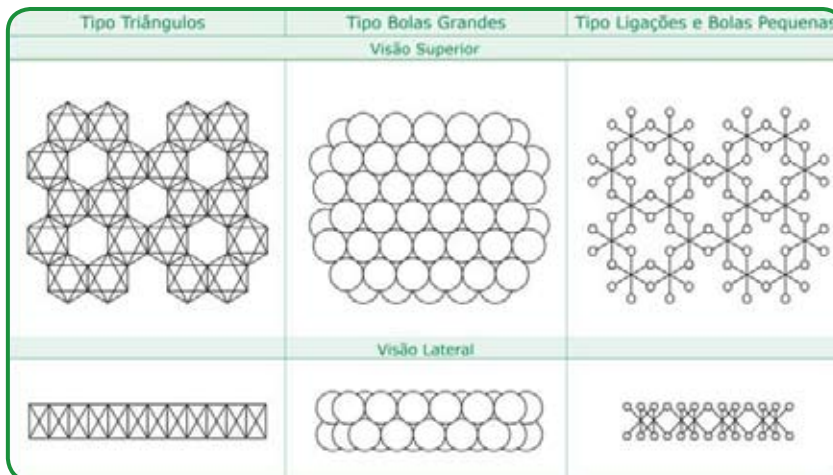
Os tetraedros de alumínio e os octaedros de alumínio são as unidades básicas de formação dos minerais silicatos de alumínio. Essas unidades se polimerizam formando lâminas. Temos lâminas constituí-

das de tetraedros, em que os três oxigênios da base de cada tetraedro são compartilhados com outros tetraedros (Figura C.11).



**Figura C.11** - Esquemas de lâminas tetraedrais, com visão de cima e lateral (Meurer, 2004).

Algo semelhante ocorre a polimerização de octaedros de alumínio, formando lâminas octaedrais (Figura C.12).



**Figura C.12** - Esquemas de lâminas octaedrais, com visão de cima e lateral (Meurer, 2004)

Como foi visto nas duas figuras acima (C.8 e C.9), tetraedros podem se unir com outros tetraedros (formação de uma lâmina tetraedral), e octaedros podem se unir com outros octaedros (formação de uma lâmina octaedral).

Agora, estamos aptos a visualizar a união de uma lâmina tetraedral com uma lâmina octaedral. O átomo de oxigênio apical do tetraedro é compartilhado (ligado) com o octaedro de alumínio, resultando na união das lâminas (um oxigênio faz a ponte entre o silício do tetraedro e



o alumínio do octaedro). As lâminas unidas são chamadas de camadas. Essas camadas se empilham em número variável e, junto com sua extensão, determinam o tipo de mineral. É através do empilhamento das camadas que os **filossilicatos** se formam. Este é o grupo de silicatos que predomina na fração argila dos solos.

Desse modo, as unidades básicas simples (tetraedros e octaedros) são organizadas em estruturas mais complexas, que são as lâminas tetraedrais e octaedrais. A união de lâminas tetraedrais e octaedrais, pelo compartilhamento de oxigênio forma uma camada. A associação das camadas e seu espaço entre-camadas definem o grupo de mineral de argila.

Assim, os minerais de argila presentes nos solos podem ser classificados em função:

- da organização de suas camadas (estruturas 1:1 e 2:1);
- da carga total da lâmina;
- do preenchimento da lâmina octaedral (di ou tri-octaedral);
- do caráter expansivo ou não do espaço entre-camadas, o qual depende do local do déficit de carga resultante da substituição isomórfica e do cátion neutralizador.

### 1.1.3. Mineralogia da fração silte e areia

Os minerais das frações silte e areia são importantes porque são fontes potenciais de **nutrientes** para as plantas e outros seres vivos que habitam o solo. Essa liberação se dá de forma muito lenta, sendo necessária a sua suplementação na forma de adubos. À medida que o solo evolui, ele envelhece e os minerais primários, à exceção do quartzo, se decompõem, liberando lentamente os nutrientes neles contidos. Os principais minerais da fração areia e silte são:

- quartzo: é um dos minerais mais comuns na fração areia dos solos, devido a sua alta resistência física e química. Sua importância está mais associada à parte física do solo, influenciando sua textura (quanto mais quartzo, mais arenoso é o solo), do que propriamente ao reservatório de nutrientes. Devido a sua alta cristalinidade, praticamente não apresenta cargas para adsorção de íons e, o quartzo praticamente, não se decompõe no solo para liberação de seus componentes.
- feldspatos: formam um grupo de minerais muito importante nas rochas e podem ser divididos em feldspatos potássicos (possuem potássio em sua estrutura) e feldspatos calco-sódicos (possuem cálcio e sódio em sua estrutura). Quando esses minerais se decompõem por ação do intemperismo, esses nutrientes são liberados e são fontes suplementares às plantas.
- piroxênios e anfibólios: esses minerais contêm magnésio, cálcio e ferro em sua estrutura, que, da mesma forma que os feldspatos, podem contribuir para a nutrição das plantas quando da sua decomposição.
- micas: as micas podem ser divididas em duas classes, a muscovita e a biotita. A muscovita é fonte de potássio nos solos e a biotita, fonte de potássio e magnésio. Esta se decompõe mais rápido que a muscovita.

### + SAIBA MAIS

Os **filossilicatos** constituem um grupo de minerais com grande importância para a geologia, pedologia e para a indústria. A palavra filossilicato deriva do grego *phylon*, que significa folha, uma vez que todos os membros desse grupo possuem hábito achatado ou em escama e clivagem basal de perfeita a proeminente e lamelas de clivagem (placas) flexíveis, elásticas ou plásticas e mais raramente, quebradiças. De um modo geral, os filossilicatos exibem dureza baixa, normalmente inferior a 3,5, na escala Mohs, e densidade relativamente baixa em relação a outros silicatos. As peculiaridades mais marcantes dos filossilicatos representadas principalmente pela divisibilidade, dureza e hábito, residem na estruturação desse grupo de minerais, que é bastante numeroso. A estrutura constituída por tetraedros de silício compartilhados, em duas dimensões, formam uma folha, em que três dos quatro oxigênios dos tetraedros  $\text{SiO}_4$  são compartilhados com os tetraedros vizinhos, levando a uma relação  $\text{Si:O}=2:5$ , que é denominada “folha siloxama” ou simplesmente folha tetraédrica (T).

As plantas necessitam dos seguintes **nutrientes** para completar seu ciclo e, por isso, estes são considerados essenciais: carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cloro, cobre, ferro, manganês, molibdênio e zinco. Algumas plantas podem usar o sódio e o silício, e as bactérias que se associam às plantas fixadoras de  $\text{N}_2$  necessitam de cobalto.

#### 1.1.4. Mineralogia da fração argila

Os minerais da fração argila (argilominerais) são geralmente formados a partir da reorganização de elementos originários dos minerais primários. Os principais minerais da fração argila de solos são os filosilicatos de alumínio e os óxidos de ferro e alumínio. Os filossilicatos se dividem em dois grandes grupos: os do tipo 2:1 e os do tipo 1:1, que se referem ao número de lâminas tetraédricas em relação às octaédricas.

##### Argilominerais do tipo 2:1

São minerais que apresentam as camadas formadas por duas lâminas tetraedrais ligadas a uma lâmina octaedral. As principais características dos argilominerais 2:1 são:

- a. presença de substituição isomórfica. O que é substituição isomórfica? Imagine que você esteja fazendo um muro com tijolos maciços. Junto com os tijolos maciços há alguns tijolos de 4 furos. Sem perceber, você coloca no muro alguns tijolos de 4 furos. O que vai acontecer? O muro ficou imperfeito. Pois é assim mesmo que ocorre no solo. Nos tetraedros, constituídos de silício, pode haver um **erro químico** e no lugar do  $\text{Si}^{+4}$  pode entrar um  $\text{Al}^{+3}$ . Qual o resultado? Os oxigênios do tetraedro ficarão mais carregados, pois saiu um íon com 4 cargas positivas e entrou um outro com apenas 3 cargas positivas. No octaedro, pode ocorrer o mesmo fenômeno: em vez da construção de um octaedro puro de  $\text{Al}^{+3}$ , pode haver a substituição isomórfica por um  $\text{Fe}^{+2}$  ou  $\text{Mg}^{+2}$ , e sobrar carga negativa nos oxigênios dos octaedros;
- b. as camadas podem se distanciar umas das outras em função da entrada de água entre elas. Isso resulta numa alta área superficial específica;
- c. em função da presença de substituição isomórfica (forma carga negativa) e da alta área de exposição ao meio, esses minerais apresentam alta capacidade para atrair cátions (íons com cargas positiva). Em Ciência do Solo, esse fenômeno se chama *Capacidade de Troca de Cátions* (CTC);
- d. como a substituição isomórfica é permanente (ela ocorreu na formação do mineral), dizemos que a CTC é permanente (não depende das variações do meio).

Esses argilominerais não são estáveis em ambientes quentes e úmidos, com altas taxas de lixiviação. Assim, a presença desses argilominerais em solos das regiões tropicais é pequena, exceto em climas áridos ou semi-áridos (pouca umidade e lixiviação) ou em locais mal drenados (acúmulo de silício e pouca lixiviação).

Os principais representantes dos argilominerais 2:1 são:

- a.** montmorilonita: apresenta substituição isomórfica de alumínio por ferro e magnésio na lâmina octaedral, conferindo-lhe carga negativa permanente (CTC permanente). Como não existe material que se interpõe entre uma camada e outra, essas argilas têm a propriedade de se expandir quando úmidas (entrada de água nas entrecamadas) e de se contrair quando secas (saída de água das entrecamadas);
- b.** vermiculita: originária da transformação das micas, tendo um número menor de íons potássio na entrecamada, conferindo-lhes uma expansividade média (menor que a das esmectitas). A vermiculita apresenta maior substituição isomórfica de silício por alumínio nas lâminas tetraédricas, fazendo com que a distância da origem da carga por substituição e a superfície do mineral sejam menores, contribuindo para uma maior atração do potássio, o que também explica a menor expansividade em relação às esmectitas;
- c.** illita: esse grupo se caracteriza pela existência de grande número de íons potássio na entrecamada, que 'soldam' as camadas da argila e determinam a não expansividade dessas argilas. Por isso, o espaço entrecamadas fica indisponível para a adsorção de íons e a CTC dessas argilas é menor que nos tipos mencionados anteriormente.

#### + SAIBA MAIS

Entende-se por lixiviação o processo que ocorre no solo quando o húmus (nutriente vegetal ou não) é levado até o lençol freático pelo movimento descendente da água da superfície (chuva ou irrigação) ao longo das camadas do perfil do solo. Trata-se da "lavagem" do solo pelas chuvas. O termo originalmente refere-se à ação solubilizadora de água misturada com cinzas dissolvidas (lixívia), constituindo uma solução alcalina eficaz na limpeza de objetos. Mas, em geoquímica ou geologia, de modo geral, é usado para indicar qualquer processo de extração ou solubilização seletiva de constituintes químicos de uma rocha, mineral, depósito sedimentar, solo, etc. pela ação de um fluido percolante. (<http://pt.wikipedia.org/wiki/Lixívia%C3%A7%C3%A3o>)

### Argilominerais do tipo 1:1

Na evolução do solo, já foi perdida uma lâmina tetraedral (dessilicação do solo). Assim, os argilominerais 1:1 são constituídos por camadas formadas por lâminas tetraedrais ligadas a uma lâmina octaedral. As principais características dos argilominerais 1:1 são:

- a.** o empilhamento das camadas (tetraedral ligada a octaedral diretamente) não permite a expansividade, diminuindo a área de exposição ao meio (ausência de superfície interna);
- b.** presença de baixa quantidade de substituição isomórfica; e
- c.** baixa capacidade para atrair cátions (íons com cargas positiva) ou CTC. As cargas negativas somente são encontradas no final do mineral (bordas) e são dependentes da constituição da água do solo, especialmente da concentração de  $H^+$ , ou dependentes do pH.

A principal representante dos argilominerais 1:1 é a caulinita. A caulinita é o principal argilomineral da maioria dos solos das regiões tropicais, juntamente com os óxidos. Esses minerais são compostos por uma lâmina de tetraedros e por uma de octaedros, ligadas através dos oxigênios apicais dos tetraedros aos octaedros, e entre uma camada

e outra, a ligação é feita por pontes de hidrogênio entre os oxigênios basais do tetraedro e o grupo hidroxila (OH) dos octaedros. Devido a essa ligação, as camadas não se afastam e a argila tem uma baixa superfície específica e uma baixa CTC efetiva (a CTC predominante é aquela dependente do pH).

### Óxidos (apenas lâminas octaedrais)

Os óxidos encontrados na fração argila do solo são formados apenas por lâminas octaedrais, pois já perderam as lâminas tetraedrais (dessilicação muito forte). Os óxidos mais abundantes na fração argila dos solos são os óxidos de ferro, seguidos pelos óxidos de alumínio. Em solos onde existe uma quantidade considerável de óxidos, são solos bem intemperizados. Isso é verdadeiro porque a formação de óxidos pressupõe a existência de ferro e alumínio livres na solução do solo (provenientes da decomposição de outros minerais).

A cristalinidade dos óxidos geralmente é baixa, devido às suas condições de formação, sendo que uma das suas principais características é a predominância de cargas positivas dependentes de pH, diferente das argilas 2:1, em que a predominância é de cargas negativas. Com isso, os óxidos têm papel relevante na capacidade de troca de ânions (CTA).

Os principais óxidos ocorrentes nos solos são:

- a. goetita: é a forma mineral de Fe III mais freqüente em solos, porque é mais estável que os demais. Ocorre em todas as regiões tropicais e subtropicais e é responsável pela cor marrom amarelada dos solos.
- b. hematita: é o segundo tipo de óxido mais freqüente nos solos, principalmente nos mais intemperizados. É característico de climas quentes e úmidos e tem alto poder pigmentante (1% de hematita já dá a cor vermelha ao solo).
- c. gibbsita: é o óxido de alumínio mais freqüente em solos, sendo sua estrutura composta pela ligação de lâminas octaedrais de alumínio. Esse tipo de óxido pode ser formado pela simples perda da camada tetraedral das argilas 1:1.

## 1.2. Fase sólida orgânica

A fase orgânica, ou matéria orgânica do solo, é resultante da **foto-síntese**. O principal constituinte da matéria orgânica é o carbono orgânico (58%, em média), seguido por oxigênio, hidrogênio, enxofre e fósforo. Na matéria orgânica, seja ela viva ou morta, estão contidos todos os elementos essenciais aos seres vivos, e até podem estar presentes elementos tóxicos, como é o caso do alumínio. Todo esse carbono

### + SAIBA MAIS

A **foto-síntese** é o processo através do qual as plantas, seres autotróficos (que produzem seu próprio alimento), e alguns outros organismos transformam energia luminosa em energia química, processando dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), água (H<sub>2</sub>O) e minerais em compostos orgânicos e produzindo oxigênio gasoso (O<sub>2</sub>). Através do processo, aqueles seres vivos produzem o seu próprio alimento, constituído essencialmente por açúcares, como a glicose. Este é um processo de catabolismo, a planta acumula energia a partir da luz para uso no seu metabolismo (ações necessárias para o bom funcionamento do organismo), quebrando a molécula, quando necessário, formando adenosina tri-fosfato, o ATP (a moeda energética dos organismos vivos), mediante uso do oxigênio. A foto-síntese inicia toda a cadeia alimentar. Sem esta, os animais e os outros seres heterotróficos seriam incapazes de sobreviver porque a base da sua alimentação estará sempre nas substâncias orgânicas proporcionadas pelas plantas verdes (<http://pt.wikipedia.org/wiki/Fotoss%C3%ADntese>)

contido na matéria orgânica é oriundo da atmosfera. A forma estável de carbono é  $\text{CO}_2$  na atmosfera e, portanto, o carbono orgânico do solo é instável. 'Ele sempre quer retornar à atmosfera!'. O solo representa um grande compartimento do ciclo global do carbono. A quantidade total de carbono no solo é menor que a quantidade existente nos depósitos marinhos, mas é bem maior que a quantidade existente na atmosfera. O fluxo anual de carbono entre o solo e a atmosfera representa mais de 1/10 de todo carbono existente na atmosfera. Portanto, modificações nesses fluxos alteram significativamente tanto a quantidade de carbono na atmosfera quanto no solo. Atualmente, há uma tendência de aumento na quantidade de carbono na atmosfera, causada pelo desmatamento (1 a 2 x 10<sup>9</sup> toneladas por ano), pela agricultura (1 a 2 x 10<sup>9</sup> toneladas por ano) e pela queima de combustíveis fósseis (5 x 10<sup>9</sup> toneladas por ano).

No solo, o termo material orgânico se refere a todo tipo de material de origem orgânica, vivo ou morto, reconhecível ou não. A matéria orgânica do solo inclui a biomassa microbiana, os resíduos vegetais em decomposição, os compostos orgânicos derivados da decomposição (facilmente identificáveis) e o húmus. O húmus é constituído por substâncias orgânicas em avançado estágio de alteração (decomposição e sínteses bioquímica) e geralmente não se tem conhecimento total de sua estrutura ou como se formou.

O húmus tem coloração que varia do amarelo ao marrom escuro, tem alto peso molecular e apresenta comportamento coloidal. O húmus pode ser dividido em ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e huminas. Essa divisão é feita baseando-se na sua solubilidade em ácidos e bases. Os ácidos fúlvicos são solúveis em ácidos, bases e água e possuem baixo peso molecular, quando comparados com os ácidos húmicos e huminas. Os ácidos húmicos são solúveis apenas em bases e possuem os mais altos valores de peso molecular no grupo das substâncias humificadas. As huminas são as substâncias humificadas que não são solúveis em água, ácidos ou bases.

A matéria orgânica do solo pode ser entendida como:

a. fonte de carbono, elétrons e energia e habitat para os microorganismos do solo. A ampla maioria dos microorganismos do solo é **heterotrófica**. Eles dependem de uma fonte de energia para viver, da mesma maneira que o homem. Um solo somente é considerado um solo se ele for vivo! A capacidade produtiva de um solo depende totalmente da quantidade e da diversidade biológica. Os microorganismos do solo estão envolvidos em praticamente todos os processos ligados à disponibilidade dos nutrientes essenciais, na detoxicação do solo, à dinâmica de gases, etc. Isso você verá no decorrer do curso, na disciplina de Bio-

#### + SAIBA MAIS

**Heterotrófica** - Em biologia, é o nome dado à qualidade do ser vivo que não possui a capacidade de produzir o seu alimento a partir de material inorgânico e, por isso, se alimenta de outros seres. O contrário de Autotrofismo. São heterotróficos todos os animais, a maior parte dos protistas (exceto algumas algas), a maioria dos fungos e algumas plantas (apenas parcialmente e de forma muito limitada). Repare, por exemplo, que os gametófitos de uma planta angiospérmica (tubo polínico e saco embrionário, no interior da flor) se alimentam com o alimento produzido pelo esporófito (a planta verde que produziu a flor).



logia do Solo, no II semestre;

**b.** fonte de nutrientes essenciais às plantas. A matéria orgânica do solo é a fonte principal de nitrogênio, enxofre e boro e uma fonte importante de fósforo e molibdênio às plantas. Como esses nutrientes fazem parte da estrutura da matéria orgânica, eles somente estarão disponíveis (na solução do solo) depois que foram mineralizados pelos microorganismos do solo (decomposição da matéria orgânica do solo). Desse modo, nós que trabalhamos com o solo, devemos constantemente manter plantas crescendo sobre o solo, pois seus resíduos vegetais manterão os níveis adequados de matéria orgânica;

**c.** fonte de cargas negativas e de retenção de cátions. Como foi visto anteriormente para os argilominerais, na matéria orgânica do solo, também pode haver desequilíbrio eletrônico. Você se lembra de suas aulas de Química orgânica no Ensino Médio? Pois lá você aprendeu que há diferentes grupos funcionais, como os ácidos carboxílicos, os fenólicos, os álcoois, as cetonas, as amidas e aminas, os aldeídos, entre outros. Todos esses grupos funcionais encontram-se na matéria orgânica do solo. Quando eles estão em contato com a água do solo (solução), eles podem perder ou ganhar hidrogênio. Geralmente, os grupos funcionais perdem hidrogênio e ficam negativos. Nessas cargas negativas, serão armazenados os elementos essenciais à vida, como é o caso do cálcio, magnésio e potássio (veremos isso no decorrer das disciplinas de Solo);

**d.** agente estabilizador dos agregados do solo. As diferentes substâncias que compõem a matéria orgânica do solo auxiliam na união entre as diferentes partículas (areia, silte, argilominerais, células de microorganismos, etc);

**e.** armazenadora de água. A matéria orgânica do solo é extremamente porosa, onde é armazenada grande quantidade de água. Essa água é mantida no solo com força suficientemente forte para impedir a drenagem, mas fraca o suficiente para que as plantas possam absorvê-la.

A quantidade de carbono existente no solo depende de um grande número de fatores. Entre os fatores mais importantes destacam-se: (a) as condições ambiente (especialmente temperatura e precipitação), (b) a quantidade de argilominerais presentes no solo e (c) o balanço entre quantidade adicionada e taxa de decomposição. A quantidade de carbono (este pode ser compreendido como de matéria orgânica) em um solo em equilíbrio com a vegetação pode, de modo simplista, ser entendida pela relação:



$$C = a / k, \text{ onde } a = b \cdot m$$

**C** representa a porcentagem de carbono, **a** é a adição anual de carbono no solo (t/ha), **k** representa a taxa anual de decomposição do carbono orgânico do solo, **b** é a quantidade de material orgânico fresco (galhos, folhas, etc.) depositada no solo anualmente e **m** é a taxa de conversão de b para carbono orgânico.

Essa relação permite compreender as diferenças no conteúdo de carbono em diversos ambientes. Utilizando os valores fornecidos na Tabela C.4, podemos perceber porque, por exemplo, a quantidade de carbono em equilíbrio na floresta tropical é maior que no solo cultivado, apesar dos dois ambientes receberem a mesma quantidade de material orgânico fresco.

A taxa de decomposição (**k**) sofre grande influência dos fatores ambientais, como temperatura e umidade. Valores de **k** elevados, associados à exportação de nutrientes pela colheita e perdas por erosão, podem causar um esgotamento muito rápido da matéria orgânica dos solos cultivados nos climas tropicais. Para evitar ou minimizar esses efeitos, recomenda-se fazer a manutenção constante de plantas vivas ou seus resíduos na superfície do solo, utilizar corretamente as práticas de conservação do solo, utilizar adubação verde, rotação de culturas e adubações minerais bem balanceadas.

Ecosistema	b (t/ha)	m (%)	a (t/ha)	k (%/ano)	C (%)
Floresta Tropical	5,0	50	2,5	2,7	4,2
Floresta Temperada	2,2	40	0,8	0,7	2,0
Savana Tropical	0,9	45	0,4	1,2	0,8
Pradaria	1,4	35	0,5	0,4	3,0
Solo Cultivado	5,0	40	2,0	7,0	2,0

**Tabela C.13** - Valores estimados dos parâmetros relacionados ao carbono em equilíbrio em diversos ambientes.

## 2. Fase líquida

A fase líquida geralmente é abordada sob dois aspectos. O primeiro é o aspecto quantitativo e se preocupa com a quantidade de água existente no solo, seu movimento em função de gradientes de energia, permeabilidade de solo, sendo, com frequência, chamada de água do

solo. No segundo aspecto, a fase líquida do solo é abordada qualitativamente, procurando-se analisar os íons nela dissolvidos e os efeitos de sua concentração no comportamento do solo e das plantas. Sob esse aspecto, é chamada de solução do solo. Sob o aspecto de fertilidade, a água é o veículo de absorção dos nutrientes que são liberados da fase sólida.

### 3. Fase gasosa

A fase gasosa, ar do solo ou ainda atmosfera do solo difere da atmosfera em vários aspectos (Tabela C.5). A respiração dos microorganismos e das raízes, por exemplo, é responsável pela maior concentração de gás carbônico no ar do solo. Enquanto, na atmosfera, existem aproximadamente 0,03% de CO<sub>2</sub>, no ar do solo, pode haver de 10 a 20 vezes mais. Esse aspecto é de interesse ecológico, tornando o solo uma importante fonte de CO<sub>2</sub> para a atmosfera e para o ecossistema do qual faz parte. Com isso, vemos que o solo também é uma 'fase' de um sistema maior, o ecossistema. Um dos principais fatores é a presença de oxigênio no ar do solo, responsável pelos processos de respiração das raízes, respiração de organismos aeróbios e também pelo processo de oxidação no solo. A umidade do solo também é muito diferente da do ar do solo, chegando próxima dos 100%.

Atmosfera	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Ar	20,90	0,03	78,90
Solo	19,60	0,90	79,00

**Tabela C.14** - Porcentagem de oxigênio, gás carbônico e nitrogênio na atmosfera e no solo.

As três fases do solo (sólida, líquida e gasosa) estão intimamente ligadas (Figura C.10). Na realidade, os diferentes tamanhos das partículas sólidas e da porosidade interna de alguns minerais fazem com que, na organização da fase sólida, sobrem espaços livres. Imagine que você tenha brita de diferentes tamanhos, areia de diferentes tamanhos, silte, argila (terra bem fina) e matéria orgânica com diferentes estágios de decomposição. Agora, tente colocar tudo dentro de uma caixa. Sobrarão espaços vazios? Logicamente que sim. Alguns espaços serão grandes e outros tão pequenos que você terá dificuldades de vê-los. Os espaços pequenos serão preenchidos com água. A água ficará

retida nos poros pequenos. Cada solo (arranjo da fase sólida) terá uma quantidade de poros pequenos e, conseqüentemente, uma capacidade de armazenamento de água. Os poros grandes, onde não é possível reter a água (a água saiu do solo e vai para o lençol freático), serão preenchidos pela fase gasosa. Então, quando chove ou se faz uma irrigação, os poros pequenos serão totalmente envidados de água, e a quantidade de ar será pequena. Contrariamente, quando as plantas absorverem a água, diminuirá a quantidade de poros ocupados pela água e aumentará a quantidade de ar no solo.

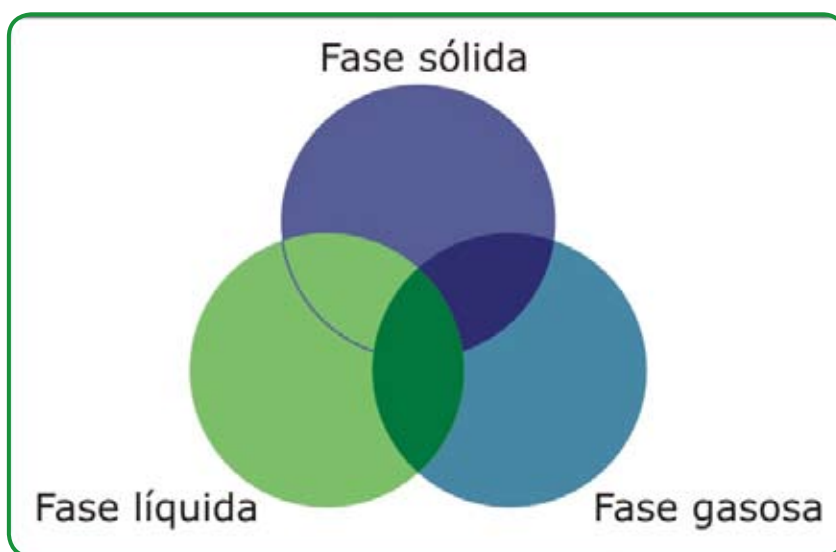


Figura C.15 - Interconexões entre as três fases do solo.

#### ATIVIDADE

**Atividade C3** - Para realizar a atividade, entre em contato com o professor da disciplina.

## 4. Aplicação

Procurar na Internet ou em jornais antigos quais foram as produtividades médias da soja das últimas três safras. Veja se essas baixas produtividades estão relacionadas com a fase líquida do solo.

## 5. Atividades de complementação, revisão e fixação do conteúdo.

#### ATIVIDADE

**Atividade C4, C5 e C6** - Para realizar a atividade, entre em contato com o professor da disciplina.

## 6. Bibliografia utilizada

### 6.1. Bibliografia básica da Unidade C

KAMPF, N. & CURI, N. Argilominerais em solos brasileiros. In: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. **Tópicos em ciência do solo**. Volume III, 2000. p.1-54.

MEURER, J.E. **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre: Gênese, 2000. 174p.

MEURER, J.E. **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre: Gênese, 2004. 2.ed. 290p.

SANTOS, G.A. & CAMARGO, F.A.O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. 508p.

### 6.2. Bibliografia complementar da Unidade C

BRADY, N.C. & WEIL, R.R. **The nature and properties of soils**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. 960p.

OLIVEIRA, J.B., JACOMINE, P.K.T. & CAMARGO, M.N. **Classes gerais de solos do Brasil**. Jaboticabal: FUNEP, 1992. 201p.

PEDRON, F.A.; AZEVEDO, A.C. de; DALMOLIN, R.S.D.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. **Principais solos da região da Quarta Colônia, Rio Grande do Sul: guia de excursão**. Santa Maria: Departamento de Solos, UFSM, 2007. 41p.

## UNIDADE D

### Pedogênese

#### Introdução

O conjunto de processos que leva à degradação e decomposição das rochas é denominado de intemperismo, que pode ser de natureza física ou química. Os processos de formação do solo são divididos em gerais (adição, remoção, transformação e translocação) e específicos, que conduzem à formação de tipos distintos de solos. Os fatores de formação do solo definem o estado do sistema, no qual atuam os processos. Esses fatores são o material de origem, o clima, o relevo, os organismos vivos e o tempo.

#### Objetivos

Os objetivos desta unidade são:

- discutir que reações causam a transformação da rocha;
- apresentar os processos gerais de formação do solo atuantes em todas as situações;
- abordar processos específicos de formação do solo que levam à caracterização de tipos diferenciados (classes) de solo;
- analisar os cinco fatores de formação do solo que definem o estado do sistema; e
- apresentar e estimular aplicações dos conceitos apresentados.

### 1. Intemperismo das rochas e formação do solo

#### 1.1. Definição de intemperismo

O conjunto de processos que leva à degradação e decomposição das rochas é denominado de intemperismo. Esses processos estão relacionados com dois fatores: a natureza da rocha e a condição ambiente.

A maioria das rochas forma-se em ambientes muito distintos das condições na superfície do planeta. Enquanto as rochas se formam em ambientes com temperatura e pressão elevadas e constantes, em au-

sência de luz, organismos e vento, quando são expostas na superfície do planeta, encontram condições bem diferentes: temperaturas e pressões menores, porém, com grande variação ao longo do dia, da noite e das estações do ano, com presença de organismos, variação de umidade e presença de luz. O conjunto desses fatores é chamado de intempéries. Face à ação das intempéries sobre as rochas expostas ocorre desagregação e desestruturação das mesmas.

## 1.2. Intemperismo físico

O intemperismo físico é composto pelos processos que levam à fragmentação da rocha, sem modificação significativa em sua estrutura química ou mineralógica. Essas quebras podem ocorrer por vários processos, como a variação de temperatura, crescimento de raízes, congelamento e precipitação de sais, em que os dois primeiros processos são os mais importantes para as condições climáticas do sul do Brasil.

A maior contribuição do intemperismo físico é o aumento de **área superficial específica** para o avanço do intemperismo químico e a pedogênese.

Com a variação de temperatura, as rochas, que são compostas por diversos minerais, se dilatam e contraem de maneira diferenciada (coeficientes de dilatação e contração distintos), com direção e com intensidade diferentes, gerando tensões no corpo da rocha e levando à **fadiga e fratura do material**.

Espécies pioneiras arbustivas e arbóreas podem exercer grandes pressões sobre as rochas, através do crescimento das raízes entre as fendas. Exemplos típicos dessa força são os danos causados pelas raízes de algumas árvores ao calçamento e às fundações das construções.

## 1.3. Intemperismo químico

Na natureza, é praticamente impossível separar o intemperismo físico do intemperismo químico, já que ocorrem quase simultaneamente e devido à diferença de ambiente na formação da rocha em relação ao ambiente na formação do solo. As transformações e reações que ocorrem são no sentido do equilíbrio com o ambiente.

O intemperismo químico é o conjunto de reações que levam à modificação da estrutura dos minerais que compõem a rocha. O intemperismo químico aumenta à medida que o intemperismo físico avança, devido ao aumento de área superficial específica dos minerais.

As principais reações químicas são hidratação, solução, complexa-

### ! ALERTA

A **área superficial específica** refere-se à somatória da área da superfície de um mineral dividida pela sua massa ou volume. Assim, para uma mesma massa, quanto mais finamente dividido o mineral, maior a sua área superficial e maior a possibilidade de ocorrerem fenômenos de superfície. Nesse caso, maior será a interação da água com os minerais da rocha.

### + SAIBA MAIS

O processo de **fadiga** leva ao processo de esfoliação, no qual a rocha (ou pedra) solta camadas, similarmente a uma cebola. Você pode encontrar essas pedras em solos mais rasos, porém, argilosos e vermelhos, nas áreas mais declivosas do Rio Grande do Sul, onde o solo não é muito profundo.





vérticas (*vide* Unidade B);

a. quando a dessilicação é média, o que é mais freqüente nos trópicos, formam-se solos com argilas 1:1 (solos caulíníticos), predominantes nos solos gaúchos usados para agricultura;

b. quando a dessilicação é forte, a dessilicação e a lixiviação são intensas ou atuam durante um longo tempo sem que houvesse um rejuvenescimento do solo por aporte de material. Os argilominerais predominantes são os óxidos de ferro (hematita e goetita) e de alumínio (gibbsite) (*vide* Unidade C). No Rio Grande do Sul, solos do Planalto contêm uma proporção significativa desses minerais.

### 1.3.2. Oxidação e redução (oxi-redução)

Quimicamente, refere-se ao processo de transferência de elétrons, em que o íon receptor de elétrons é reduzido (porque tem seu número de oxidação diminuído) e o que doa o elétron é oxidado.

Em solos, a oxidação e a redução do ferro e do manganês têm maior importância na gênese do solo, enquanto as do nitrogênio, na **fertilidade do solo**. Assim, o  $Fe^{2+}$  (íon ferroso) é muitíssimo mais solúvel que o  $Fe^{3+}$  (íon férrico) e pode ser removido do ambiente por solução. Nos minerais primários, o ferro encontra-se geralmente reduzido ( $Fe^{2+}$ ) e sua oxidação pode causar a desestruturação do mineral.

## 2. Fatores de formação do solo

Os fatores de formação de solos são elementos que estabelecem as condições ou estado do sistema ou, utilizando os conceitos da Unidade A, caracterizam as esferas (litosfera, atmosfera e biosfera) existentes na gênese de determinado solo.

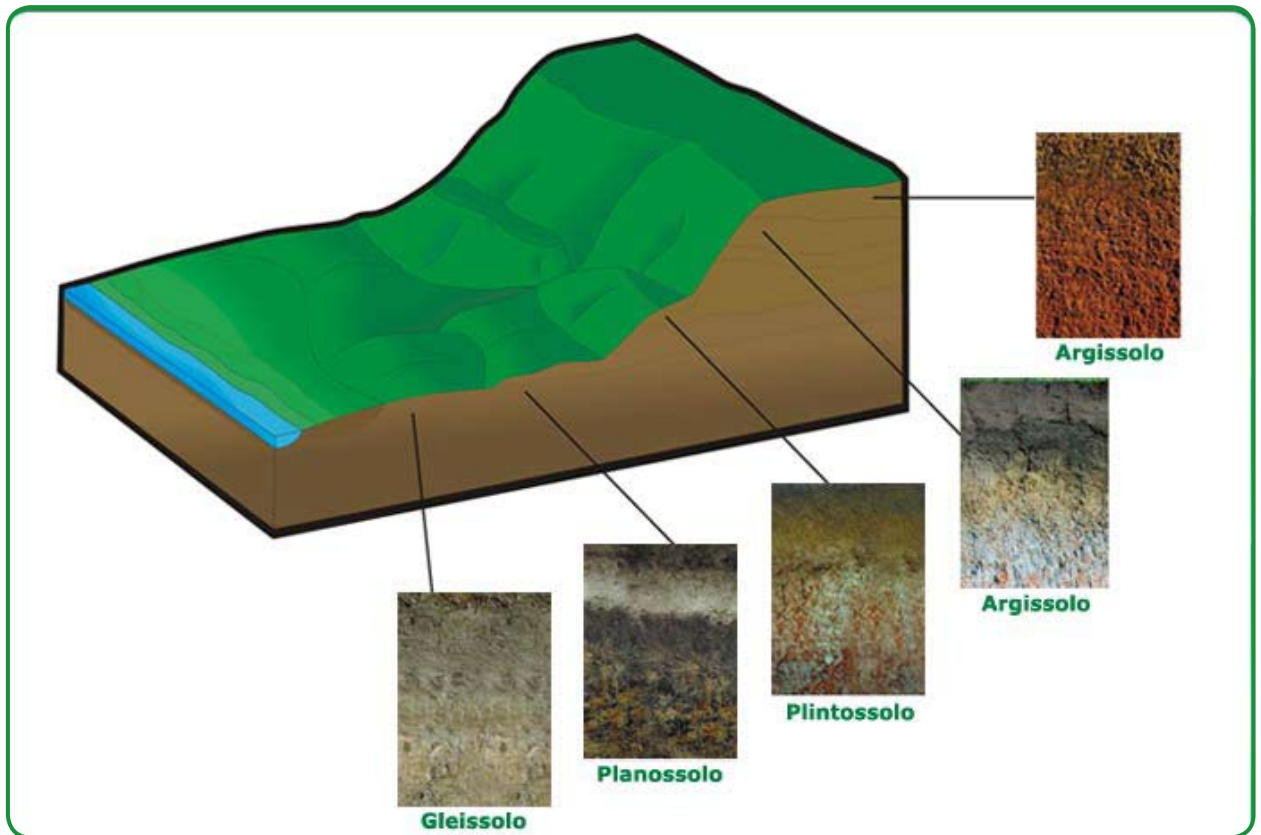
Os principais fatores de formação de solos são o material de origem, o relevo, o clima, os organismos e o tempo, os quais estão inter-relacionados entre si na natureza. Por exemplo, o relevo afeta o clima, seja alterando o padrão de chuvas ou afetando a temperatura.

Quando um fator varia de maneira muito mais acentuada que os outros (os quais são, então, considerados constantes), é possível avaliar seus efeitos.

Assim, temos climoseqüências (variação climática), toposeqüências (variação na topografia – Figura D.1) e litoseqüências (variação no material de origem) de solos.

#### + SAIBA MAIS

A forma reduzida ( $Fe^{2+}$ ) é a forma utilizada pelas plantas, mas pode ser tóxica quando em excesso, como em cultivo de arroz irrigado por inundação em solo com maior teor de óxidos de ferro. O  $Fe^{2+}$  pode se acumular na superfície externa da raiz, pois oxida quando na presença de oxigênio. Isso é observável pela cor vermelha revestindo raízes de plantas em ambientes de má drenagem ou em plantas de arroz irrigadas por inundação. Com a redução do nitrogênio, há formação de formas gasosas de N, as quais contribuem para a destruição da camada de ozônio, constituindo-se num grave problema ambiental.



**Figura D.1** - Toposequência de tipos de solos na região da Depressão Central do Rio Grande do Sul. Fonte: Fotos de Streck et al. (2002).

## 2.1. Material de origem

O material de origem é o material do qual o solo se forma, podendo ser de natureza mineral (solos de origem mineral) ou orgânica (solos orgânicos).

### 2.1.1. Material de origem orgânica

Os solos orgânicos estão geralmente associados a ambientes mal drenados ou muito frios. Formam-se pela adição pela superfície, resultando em material menos transformado próximo à superfície e mais transformado em profundidade (contrário da tendência dos solos minerais que serão discutidos em mais detalhe a seguir). Os solos orgânicos têm pouca expressão no Rio Grande do Sul, embora desempenhem uma função ecológica fundamental na regulação do ciclo hidrológico e na disponibilidade de água, funcionando como uma esponja para o sistema. O uso predominante é como substrato para olericultura e floricultura.

#### ! ALERTA

Os solos orgânicos podem ser usados como fonte de energia, fato muito comum durante tempos de guerra, em que não há outras fontes de energia. Quando usados para a agricultura, os problemas potenciais dos solos orgânicos são a acidez, a saturação com água, a subsidência (após drenagem e decomposição do material) e a salinidade.

### 2.1.2. Material de origem mineral

A maioria dos solos com aptidão para usos agropecuários e florestais é de natureza mineral. Os materiais de origem mineral podem ser rochas, materiais retrabalhados ou mesmo outro solo. A rocha é fonte de minerais herdados no solo e de solutos para fase líquida do solo e, se a concentração for alta suficiente, para a formação de minerais secundários.

A intensidade da decomposição das rochas depende da condição da rocha e da intensidade e tipo do intemperismo. As características da rocha que podem influenciar seu intemperismo são: sua composição mineralógica, organização dos minerais na massa da rocha, cimentação, dureza, permeabilidade e a maneira como a rocha se desagrega (intemperismo físico).

A alteração também depende da intensidade do intemperismo, ou seja, do clima. Essencialmente, a temperatura e a umidade são os mais importantes, mas, em certas regiões, outros fatores, como vento e gelo, podem também ser relevantes. Mesmo minerais facilmente intemperizáveis podem ser encontrados praticamente inalterados em ambientes desérticos, por exemplo. A presença de fendas, poros e fraturas, pela maior infiltração de água, e a cor escura, pela maior absorção de calor e maior dilatação, podem acelerar o intemperismo.

O domínio das **rochas magmáticas extrusivas** (Formação Serra Geral), com predomínio do basalto, cobre praticamente toda porção Norte do Rio Grande do Sul, ocorrendo, em algumas porções, o diabásio e arenitos (em Tupanciretã). Nessa região, as diferenças entre os solos estão mais associadas ao clima. Assim, na parte sudoeste do Rio Grande do Sul, onde o clima é mais seco, temos solos menos desenvolvidos, e na porção norte, solos profundos, intemperizados e bastante argilosos.

O domínio dos pacotes sedimentares (Bacia do Paraná), conhecida como Depressão Central Gaúcha, margeia a formação anterior. Essas formações possuem muita variação em suas características de cor (presença ou ausência, quantidade e tipo de óxidos e outros minerais constituintes) e textura (argilitos, siltitos, arenitos finos, arenitos grossos, etc.), originando vários tipos de solos. Como é uma região geologicamente mais antiga que a anterior, seus vales foram suavizados há muito pela ação erosiva dos rios, que atualmente correm ao longo de extensas planícies, entulhadas de sedimentos recentes (quaternário), conhecidas regionalmente como várzeas e intensivamente cultivadas com arroz, base econômica de muitos dos municípios da região.

O Escudo Sul-riograndense, a província geológica mais antiga do estado, encontra-se mais a Sudeste. Devido à sua constituição predo-

#### + SAIBA MAIS

**Rochas extrusivas** formam-se quando o magma extravasa a superfície da terra e ocorre o resfriamento rápido (em termos relativos), havendo formação de cristais pequenos, os quais geram solos com mais material fino (argila), quando da sua intemperização. Rochas intrusivas formam-se quando não ocorre extravasamento do magma e o resfriamento é lento, havendo formação de cristais maiores, os quais geram solos com mais material grosseiro (areia), quando da sua intemperização.

minante de rochas intrusivas (ou plutônicas, como o granito) e suas correspondentes metamórficas (como o gnaiss), extremamente resistentes, essa região ainda se mantém em um nível mais elevado na paisagem, em relação à Depressão Central. Os solos dessa região são geralmente pobres, devido à natureza ácida da maioria das rochas existentes. Entretanto, devido à grande variedade e complexidade geológica dessa região, existem várias exceções à regra.

A Planície Costeira é o domínio dos sedimentos marinhos depositados pelas sucessivas transgressões e regressões marinhas e é de pouca importância agrícola.



**Figura D.2** - Distribuição dos principais materiais de origem (rochas) ocorrentes no Estado do Rio Grande do Sul

### ATIVIDADE

**Atividade D2** - Para realizar a atividade, entre em contato com o professor da disciplina.

## 2.2. Relevo

O relevo afeta a formação de solos por redistribuir a energia advinda da radiação solar e os materiais água (movimento na superfície e na subsuperfície) e colúvio (material transportado por gravidade).

A influência do relevo ocorre em duas escalas. Para grandes regiões, o relevo pode afetar o clima, como foi exemplificado para os Campos de Cima da Serra no Rio Grande do Sul (efeito orográfico). Para áreas menores, a importância do relevo ocorre através da redistribuição da água no corpo do solo, a qual é fundamental para a continuidade das reações químicas que, por sua vez, contribuem para a evolução dos

solos.

A divisão do relevo do Rio Grande do Sul leva em conta a altitude e o material geológico:

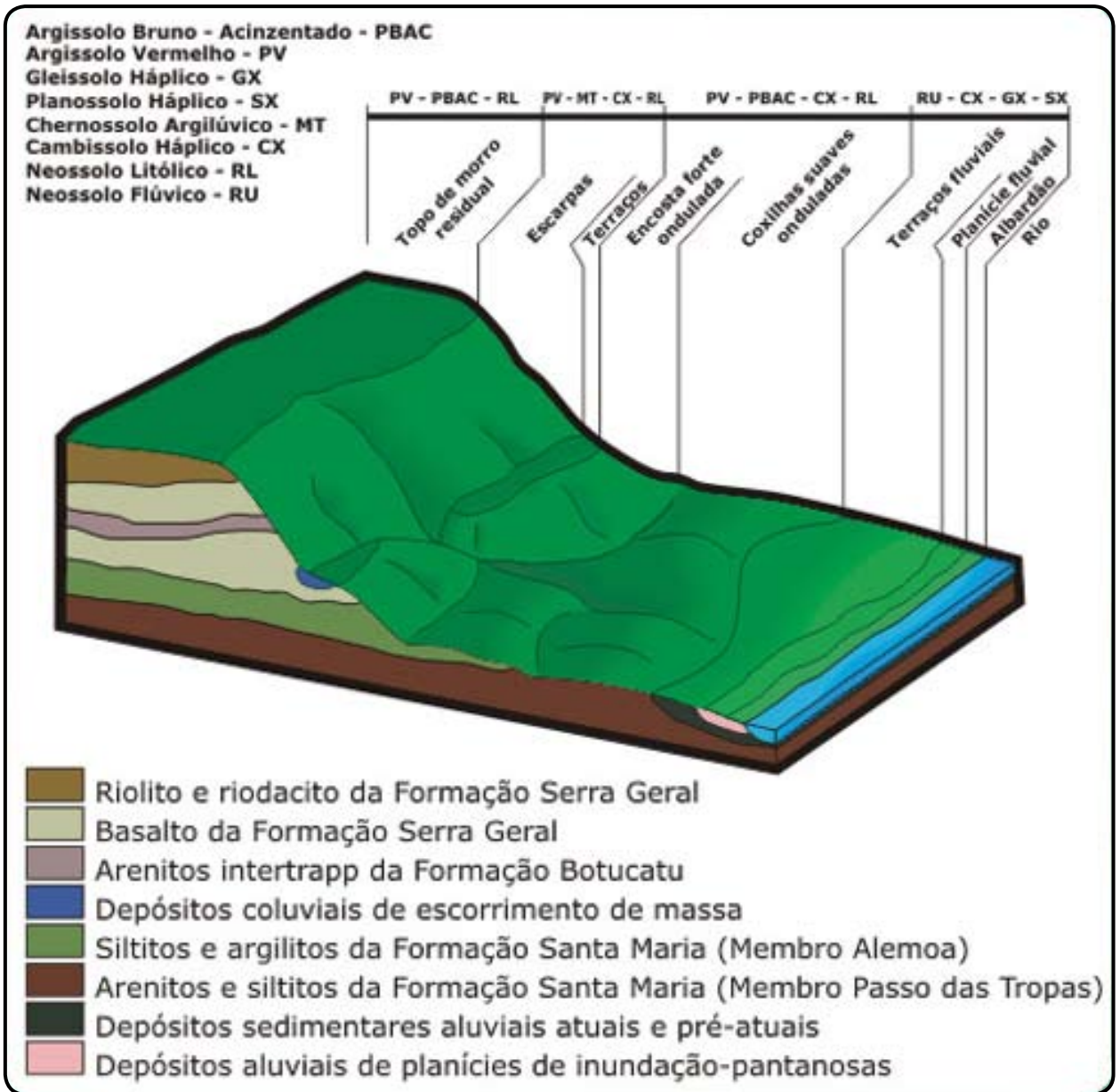
- a. Planalto é composto pelo extenso planalto basáltico, que ocupa a metade norte do estado, domínio das rochas extrusivas básicas;
- b. Depressão Central é a região situada entre o Planalto e a Serra do Sudeste. As altitudes variam de 200m a leste até 40m ou menos a oeste. O relevo se constitui de grandes planícies aluviais e de coxilhas suaves;
- c. Serra do Sudeste é a região com altitudes variando de 100 a 400m, onde se encontram as rochas intrusivas (coincide com o Escudo Sul-riograndense). O relevo é bastante movimentado, mas em área onde apresenta coberturas sedimentares é suavizado;
- d. Campanha é situada na porção Oeste do estado, é formada por relevos suaves e altitudes baixas (200 a 300m);
- e. Litoral é uma planície estreita que se estende ao longo de quase toda faixa litorânea do estado, com cotas inferiores a 40m e predomínio das dunas.

A Figura D.3. mostra um exemplo em que o material de origem e o relevo estão associados a **formas geomórficas** diferenciadas, com solos distintos.

#### **AE** GLOSSÁRIO

**Geomorfologia** é a ciência que estuda as formas do relevo terrestre.





**Figura D.3** - Distribuição geomorfológica das áreas do rebordo do Planalto, na Quarta Colônia do Rio Grande do Sul (Fonte: Adaptado de Pedron et al., 2007).

### 2.3. Clima

O clima é muito importante para o processo de desenvolvimento do solo, atuando desde os processos de decomposição de rochas (como foi visto no capítulo sobre intemperismo). As **variáveis climáticas** mais importantes são a temperatura, a precipitação e a evapotranspiração.

As reações químicas que ocorrem no solo são fortemente influenciadas pela temperatura (quanto mais altas, mais rápidas são as reações) e pela presença de água, que também é importante sob vários aspectos, dos quais destacamos: fonte de prótons para reações de decomposição dos silicatos; meio para ocorrência de reações químicas; e, em solos bem drenados, elemento transportador, para fora do solo, dos produtos das reações de intemperismo, permitindo que as reações de dissolução dos minerais continuem ocorrendo.

A combinação de altas temperaturas e alta pluviosidade caracteriza os climas tropicais. Os solos desenvolvidos sob esses climas apresentam características de evolução muito mais avançadas que os solos encontrados em regiões mais frias. Isso ocorre porque essa combinação favorece as reações de intemperismo da rocha e do solo, de modo que esses solos se intemperizam muito mais rapidamente do que aqueles que se encontram sob climas mais secos ou mais frios. Desse modo, é comum encontrarmos referências a esses solos como 'solos tropicais'.

O clima no solo (pedoclima) é que deve ser considerado, já que nem sempre o pedoclima varia de acordo com o clima atmosférico. As características térmicas (influenciadas pela cor, composição mineralógica, etc.) e hídricas (como condutividade hidráulica, capacidade de armazenamento de água, etc.) do solo variam de acordo com outros fatores de formação de solos (como material de origem e relevo, por exemplo) e não apenas com o clima.

A seguir, temos um exemplo de interação entre fatores: clima (água) e relevo locais.

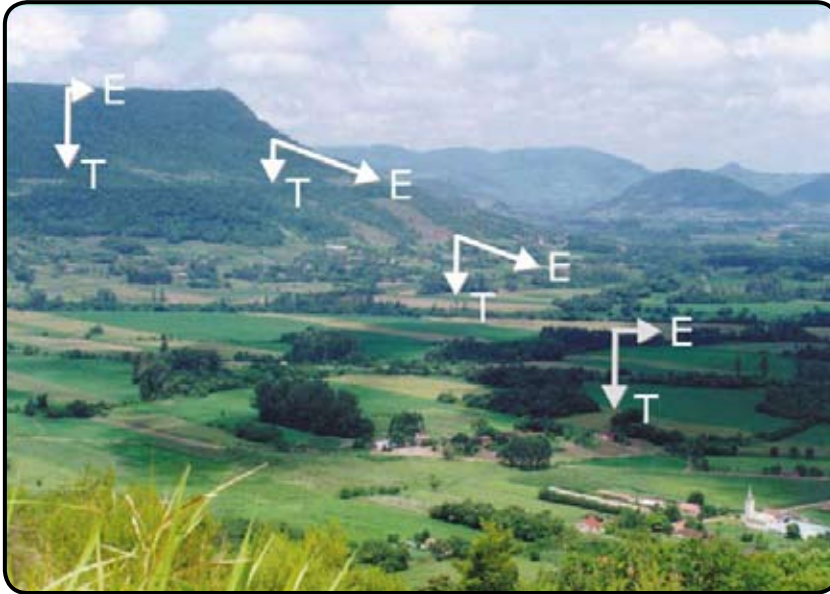
O ciclo hidrológico do solo e seus componentes variam em função do relevo e da posição na paisagem, particularmente a infiltração e o escoamento superficial (Figura D.4). Assim:

- a. em áreas planas, há bastante infiltração e pouco escoamento, e o solo formado é profundo;
- b. em áreas declivosas, a erosão pode ser maior que a infiltração, havendo pouca água para o intemperismo e bastante remoção de solo formado, sendo os solos rasos; e
- c. em baixadas planas, há acúmulo de água e sedimento coluvial (gravidade) e aluvial (trazido pelas enchentes), sendo os solos medianamente desenvolvidos.

#### + SAIBA MAIS

A temperatura média anual do Estado é de 18°C. As regiões mais quentes são a Campanha, Depressão Central e Missões, e as mais frias os Campos de Cima da Serra, Encosta Superior do Nordeste e Planalto Médio.

As precipitações são bastante variáveis de ano para ano, bem como ao longo de um mesmo ano. No Rio Grande do Sul, os meses mais chuvosos costumam ser maio, junho e setembro e os mais secos, novembro, dezembro e fevereiro. Na maioria dos anos e locais, a precipitação supera a evapotranspiração, o que significa excedente de água que pode lixiviar nutrientes e produtos do intemperismo. Historicamente, as regiões da Encosta Superior do Nordeste e dos Campos de Cima da Serra não apresentam deficiências hídricas, e as demais regiões podem apresentar deficiências maiores que 100mm, com exceção da Campanha, Depressão Central e Litoral, que podem apresentar deficiências maiores que 200mm.



**Figura D.4** - Indicação do fluxo de água na paisagem, em que 'I' representa a infiltração e 'E' o escoamento da água. Quanto maior a seta, mais intenso é o fenômeno. (Foto de Streck et al., 2002).

De maneira geral, quanto maior a pluviosidade, maior é a lixiviação de bases, a atividade biológica, o conteúdo de argila, a alteração dos minerais da rocha e do solo e a acidificação dos solos.

Essa generalização pode ser exemplificada com a formação de solos em duas regiões distintas do Rio Grande do Sul:

a. nos Campos de Cima da Serra (município de Vacaria, por exemplo), o clima é frio e úmido e os processos de formação são mais intensos, gerando solos mais argilosos, ácidos (baixo pH e alto teor de alumínio trocável), com mineralogia sem vestígios de minerais primários, exceto quartzo, predominando caulinita e óxidos de ferro e de alumínio;

b. na Campanha (município de Uruguaiana, por exemplo), o clima é mais quente e seco e os processos de alteração do material de origem são menos intensos, gerando solos com mais silte e areia. O teor de bases é alto, pH próximo à neutralidade, argilominerais com predominância de esmectitas e presença de concreções de  $\text{CaCO}_3$ , indicando a manutenção de minerais primários bastante solúveis.

### ATIVIDADE

**Atividade D3** - Para realizar a atividade, entre em contato com o professor da disciplina.

## 2.4. Organismos vivos

Sem vida não há solo. Os organismos são fundamentais para o processo de formação de solos. O solo não deve ser considerado apenas um produto de destruição das rochas, porque a ação dos organismos cria e destrói feições, propriedades e características desses materiais, dependendo de sua ação no espaço e no tempo.

Os ciclos dos elementos químicos mais importantes para a continuidade da vida na superfície terrestre (como o fósforo, o nitrogênio, o carbono, etc.) têm sempre uma parte associada ao metabolismo de organismos, em suas mais diferentes formas, e são conhecidos por ciclos biogeoquímicos.

A ação dos organismos começa tão logo a rocha é exposta à superfície. Você já deve ter visto pedras (rochas) recobertas por líquens, mas talvez nunca tenha imaginado que este é o início da formação de solos!

Assim, inicialmente, colônias de microorganismos se estabelecem à procura de substrato que lhes forneça suporte e elementos químicos para seu desenvolvimento. Esses organismos são principalmente bactérias litotróficas, capazes de oxidar elementos químicos (Fe, Mn) da estrutura dos minerais, desestabilizando-os e contribuindo para sua alteração. O produto do seu metabolismo contribui na pedogênese, na forma de ácidos orgânicos ou de substâncias que formam complexos ou quelatos com os elementos químicos liberados através do intemperismo.

À medida que a rocha vai se alterando e as colônias iniciais vão se expandindo, organismos maiores e mais complexos têm condições de se instalar e se desenvolver. Então, fungos, algas, líquens, musgos, gramineas, arbustos e árvores podem se suceder, dependendo das condições do meio (clima e disponibilidade de nutrientes, principalmente).

Mesmo depois do solo formado, quando o sistema solo-vegetação adquire um equilíbrio, a ação dos organismos continua a ser marcante, de várias maneiras: a presença de uma cobertura vegetal protege a superfície do solo das agressões do clima, como variações de temperatura, impacto das gotas de chuva, etc.; em locais com ventos fortes, a vegetação se destaca pelo seu papel protetor, dificultando o transporte de partículas; dentre outros.

Os organismos, principalmente os vegetais, são também fonte de matéria orgânica para o solo. A matéria orgânica do solo, apesar de geralmente representar uma proporção pequena nos solos minerais, possui propriedades coloidais muito mais expressas que os colóides inorgânicos. A matéria orgânica do solo é um indicador da fertilidade e de outras condições para o crescimento das plantas.



Em alguns locais, a mesofauna (cupins, formigas, minhocas) desempenha um papel fundamental no desenvolvimento de características e propriedades químicas, físicas e morfológicas do solo.

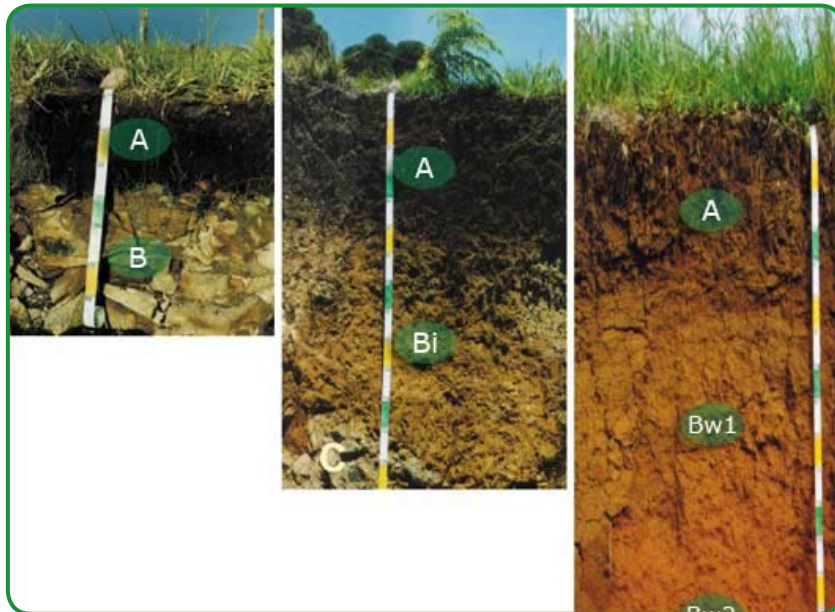
## 2.5. Tempo

O tempo é o senhor do destino!

Na **formação do solo**, a idade absoluta tem pouco significado, pois um solo velho em idade pode ser muito ou pouco desenvolvido, dependendo da intensidade do intemperismo. Assim, o tempo como fator de formação de solos se refere ao período em que os fatores ativos (clima e organismos) atuaram sobre o material de origem, condicionados pelo relevo. Em pedologia, é comum se comparar solos usando termos como *imaturo* ou *jovem*, *maduro* e *velho* ou *senil*.

Um solo é chamado de senil quando está bastante intemperizado e de imaturo quando está pouco intemperizado. Assim, podemos ter solos jovens onde o intemperismo e os processos de formação de solos ocorrem com uma taxa pequena, e solos velhos em locais onde a pedogênese é mais acelerada, ainda que os dois solos tenham a mesma idade.

Quanto mais intemperizado é o solo, menos as características do material de origem são preservadas (Figura D.5).



**Figura D.5** - Evolução temporal do solo e formação de horizontes. Veja que o perfil com horizonte latossólico (Bw) tem aspecto e cor bem distintos do solo com horizonte B em formação ou incipiente (Bi). O primeiro denominamos 'solo jovem' e o último, 'solo senil'.

Fonte: Fotos de Streck et al. (2002).

### ! ALERTA

Um solo se forma muito lentamente, podendo levar centenas de anos para formar 1 cm de solo. Outrossim, uma chuva intensa pode remover por erosão mais de 1 cm em poucas horas. Isso demonstra a fragilidade da ecosfera e a necessidade de manejá-la adequadamente, para sustentar as famílias.

### + SAIBA MAIS

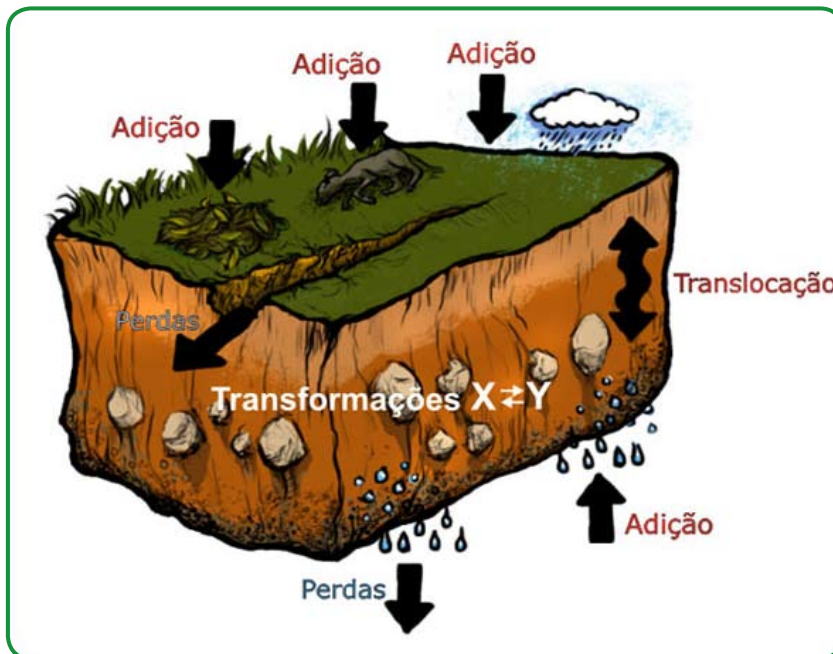
Solos imaturos ainda guardam muitas características e propriedades químicas, físicas, mineralógicas e, às vezes, até morfológicas do material de origem. À medida que o solo envelhece, os processos pedogenéticos avançam essas características iniciais vão se modificando. Mesmo assim, algumas características e propriedades, principalmente aquelas ligadas aos minerais mais resistentes, ainda podem ser percebidas. Como as altas temperaturas e precipitações nas regiões intertropicais condicionam altas taxas de intemperismo e pedogênese, é comum termos predominância de solos senis nessas regiões, também chamados de 'solos tropicais'.

### 3. Processos de formação do solo

#### 3.1. Processos gerais de formação do solo

Os processos pedogenéticos indicam a direção e a intensidade das transformações e são condicionados pela combinação dos fatores de formação do solo. Esses processos podem imprimir determinadas feições aos solos, observáveis em um perfil ou corte e descritas na morfologia do solo. Com base nas feições morfológicas e os processos que as geraram, é possível fazer uma reconstituição da história do solo, de como ele se formou, e sua classificação.

Todo o solo sofre, em maior ou menor intensidade, adição, remoção ou perda, transformação e translocação de materiais (Figura D.6.), em que:



**Figura D.6** - Processos gerais de formação do solo.  
Fonte: modificado de Brady & Weil (1996).

a. adição refere-se ao aporte de material do exterior do perfil ou horizonte do solo. Incluem-se material orgânico, água da chuva, sedimentos, cinzas vulcânicas ou material antropogênico (adubos, biocidas, resíduos, aterros, etc.), os quais são depositados sobre a superfície do solo em formação;

b. remoção ou perda é o contrário da adição, ou seja, o material é removido para fora do perfil, seja naturalmente (lixiviação, erosão, fluxo



lateral e percolação profunda) ou aceleradamente pela ação antrópica (erosão acelerada, colheita, queima, empréstimo de material para construção e nivelamento ou sistematização do solo);

**c.** transformação ocorre quando o material existente no perfil ou horizonte muda sua natureza química ou mineralógica. Nesse sentido, há a transformação do material orgânico em matéria orgânica e dos minerais primários em secundários e outras transformações químicas, como a precipitação e a dissolução química;

**d.** translocação refere-se ao processo no qual o material passa de um horizonte para outro, sem abandonar o perfil. São exemplos a eluviação/iluviação de colóides orgânicos e inorgânicos, o movimento vertical de íons para baixo e para cima (com possibilidade de formação de crostas salinas, pela ação da capilaridade e posterior evaporação) e a ação transportadora de pequenos (minhocas, cupins, formigas, etc) e grandes (tatus, lebres, etc.) animais que habitam o solo.

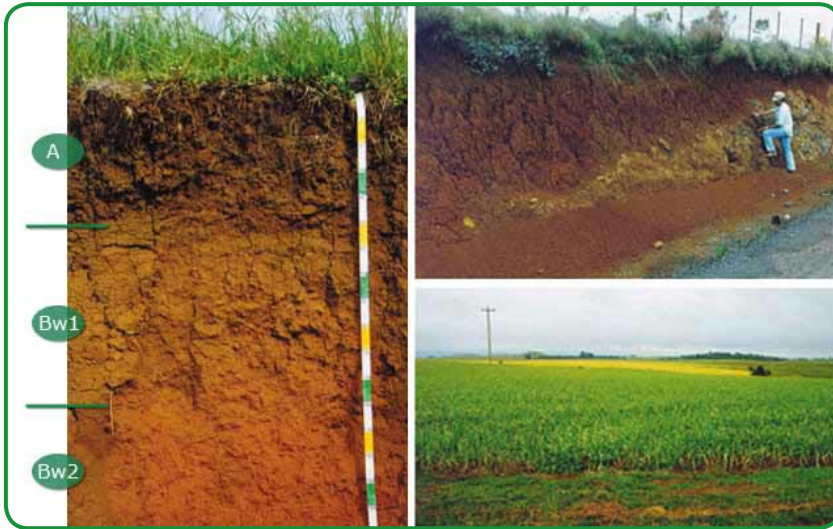
### **3.2. Processos específicos de formação do solo**

A combinação dos diferentes processos gerais, em intensidades variadas, resulta na formação de solos com características típicas de cada combinação. Com base nesse princípio, alguns processos serão descritos, mas deve-se sempre ter em mente que sua ocorrência pode se dar de forma associada.

São vários os processos específicos, incluindo-se a latolização, podzolização, gleização, laterização, salinização, sodificação ou solonização e outros processos de formação de solos de ocorrência mais localizada (paludização, carbonatação, turbação, ferrólise, etc.). No Rio Grande do Sul, assim como no restante do Brasil, os três primeiros processos predominam e, portanto, serão tratados neste texto.

#### **3.2.1. Latolização**

A latolização é caracterizada pelo intemperismo químico (especialmente a hidrólise e a oxidação) e lixiviação muito intensos ou que atuaram durante um período bastante longo, gerando dessilicação média a forte, com formação de um horizonte B latossólico (Bw). Esse processo é típico na formação de Latossolos (Figura D.7), os quais são uma das classes de solo de maior ocorrência e importância agrícola no Rio Grande do Sul.



**Figura D.7** - Perfil de um Latossolo, com a identificação do horizonte latossólico (Bw). Veja que o solo ocorre em posições de relevo mais plano e bem drenado.

Fonte: Fotos de Streck et al. (2002).

Os fatores de formação típicos para Latossolos são: material de origem capaz de formar argila (basalto, por exemplo), clima chuvoso e temperaturas mais altas, relevo plano e com boa drenagem interna, organismos vivos anaeróbios e tempo longo de ação do intemperismo.

Os solos onde esses processos predominam são ricos em caulintia e/ou óxidos de ferro e de alumínio, dependendo do grau (intensidade) da dessilicação, e pobres em sílica e bases. Isso se reflete em baixo pH, alto teor de Al trocável, baixa saturação por base e baixa capacidade de troca de cátions. Em suma, trata-se de solo pobre quimicamente.

O perfil do solo é, geralmente, profundo e homogêneo, e o gradiente textural, se existente, é pequeno, devido à estabilização dos argilominerais pelos óxidos, dificultando seu transporte para outros horizontes. Apresentam boa retenção de água, resistem à erosão, são bem estruturados, não apresentam falta de oxigênio e são facilmente trabalhados. Em suma, trata-se de solo fisicamente muito bom.

A Figura D.8. apresenta os fatores de formação, as características do solo formado e as inferências que podem ser feitas sobre sua qualidade, para solos formados por latolização, como é o caso dos Latossolos.

Fatores	Processo	Características	Classe	Inferências
<b>Clima</b> Quente e úmido	Latomização	Estrutura: granular maciça porosa	Latomossolos	Fertilidade natural baixa
<b>Relevo</b> Suave a plano		Profundo		Aerados
<b>Material de origem</b> Potencial para formação de argila		Bem drenado		Bem aerados
		Mineralogia argilas: 1:1 e óxidos		Boa mecanização
		Bom armazenamento de água		Bom armazenamento de água
<b>Organismos</b> Aeróbios		Pseudo areia		Pseudo areia
<b>Tempo</b> Longo	Máficos: atração magnética	Máficos: reserva micronutrientes		
		Não há minerais primários intemperizáveis		

**Figura D.8** - Fatores de formação, características do solo formado e inferências para o processo de latomização.

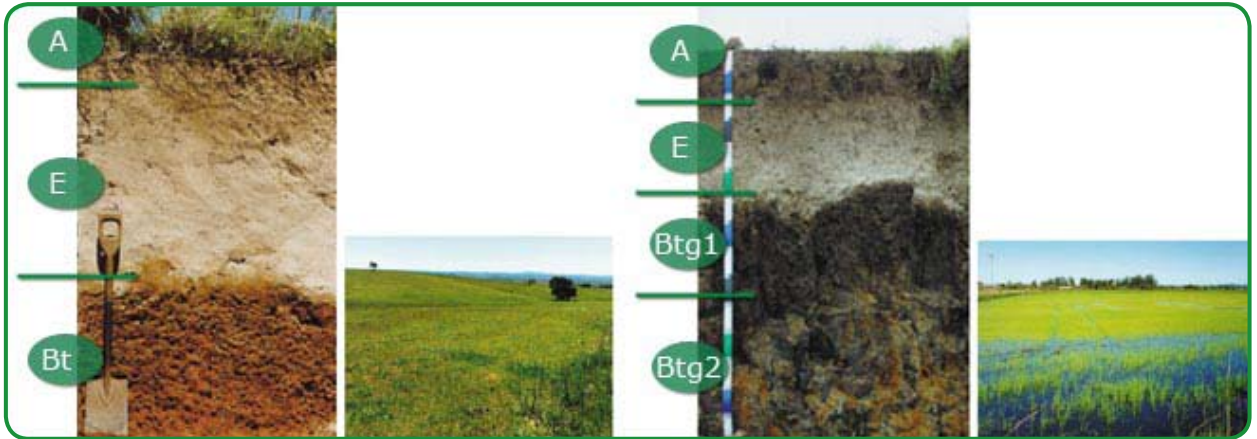
### 3.2.2. Podzolização, Lessivagem ou Eluviação/Iluviação

A lessivagem é um processo caracterizado pela transferência vertical de colóides (principalmente inorgânicos, mas também orgânicos em associação) e sua deposição em horizontes subsuperficiais.

Esse transporte ocorre, geralmente, em três fases: dispersão, transporte e deposição. Pode produzir gradiente textural no perfil (B textural, Bt) e o aparecimento do horizonte E, de perda mais intensa de material. O horizonte onde existe perda de material (geralmente o A ou o E) é chamado de horizonte eluvial, enquanto o horizonte de ganho de material (B textural) é chamado de iluvial, muitas vezes, com presença de filmes de argila que revestem os agregados (cerosidade). Os solos formados por esse processo podem pertencer a **várias classes**, como os Argissolos e Planossolos (Figura D.9).

#### + SAIBA MAIS

Em alguns solos, típicos de ambientes temperados sob florestas em solo mais arenoso e ácido, a decomposição do material orgânico depositado na superfície do solo é muito ácida, formando complexos com alumínio e ferro, que se solubilizam e são transportados para zonas mais profundas no perfil, onde a acidez é menos acentuada, precipitando-se. O horizonte que se empobrece com a saída do material é chamado de alábico, porque fica bastante claro devido à ausência de materiais pigmentantes (óxidos de ferro e matéria orgânica), e o horizonte de acúmulo é chamado de espódico (Bh, Bs ou Bhs). Os solos assim formados são chamados de Espodossolos.



**Figura D.9** - Perfil de um Argissolo (à esquerda) e de um Planossolo (à direita), com a identificação do horizonte textural (Bt). Veja que o Argissolo é bem drenado, enquanto o Planossolo é mal drenado.

Fonte: Fotos de Streck et al. (2002).

Os fatores de formação típicos são: material de origem capaz de formar argila, clima chuvoso e temperaturas mais altas, relevo ondulado, organismos vivos anaeróbios e tempo médio a longo de ação do intemperismo. Note que a diferença, em relação à latolização, está no tipo de relevo (mais ondulado) e no tempo de formação (pode ser menor).

Os solos em que esse processo ocorre têm mineralogia variada, dependendo do grau (intensidade) de dessilicação. Isso se reflete em fertilidade variada. Em suma, trata-se de solo quimicamente variável.

O perfil do solo tem profundidade variável e o gradiente textural é condição necessária. Pelo fato de haver horizonte B, a drenagem do solo é limitada e, quando, há horizonte E, pode haver fluxo lateral de água com formação de canais subterrâneos. Como os horizontes superficiais são mais arenosos, o solo é altamente suscetível à degradação estrutural e à erosão do solo. Em suma, trata-se de solo fisicamente frágil e que merece uma série de cuidados especiais!

A Figura D.10. apresenta os fatores de formação, as características do solo formado e as inferências que podem ser feitas sobre sua qualidade, para solos formados por podzolização, como é o caso dos Argissolos, Planossolos e Luvisolos.

Fatores	Processo	Características	Classes	Inferências
<b>Clima</b> Quente e úmido	<b>Podzolização</b>	Estrutura: blocos angulares ou subangulares	<b>Argissolo</b> <b>Planossolo</b> <b>Luvissolo</b>	Fertilidade natural variável
<b>Relevo</b> Suave a ondulado		Medianamente profundos a profundos		Podem existir fluxos laterais
<b>Material de origem</b> Potencial para formação de argila		Pode existir horizonte eluvial E		Impedimento às raízes
		Cuidado com a erosão		Bem drenados a mal drenados
<b>Organismos</b> Aeróbios		Armazenamento de água		Cuidado com erosão
<b>Tempo</b> Médio a Longo		Cerosidade		Espessura do A variável
		Existem minerais primários intemperizáveis		

**Figura D.10** - Fatores de formação, características do solo formado e inferências para o processo de podzolização.

### 3.2.3. Gleização

A gleização é um processo típico de ambiente com condições de redução, o que ocorre quando há saturação por água na maior parte do tempo.

Quando as condições são aeróbicas, o acceptor final da cadeia respiratória dos microrganismos do solo é o oxigênio, e sua eficiência na decomposição de materiais orgânicos pode chegar à decomposição completa em gás carbônico. Quando as condições são de excesso de água (falta de oxigênio), as populações de microrganismos aeróbios são substituídas por populações de anaeróbios, com menor eficiência na decomposição de materiais orgânicos e usuárias de outros elementos como aceptores finais dos elétrons da cadeia respiratória.

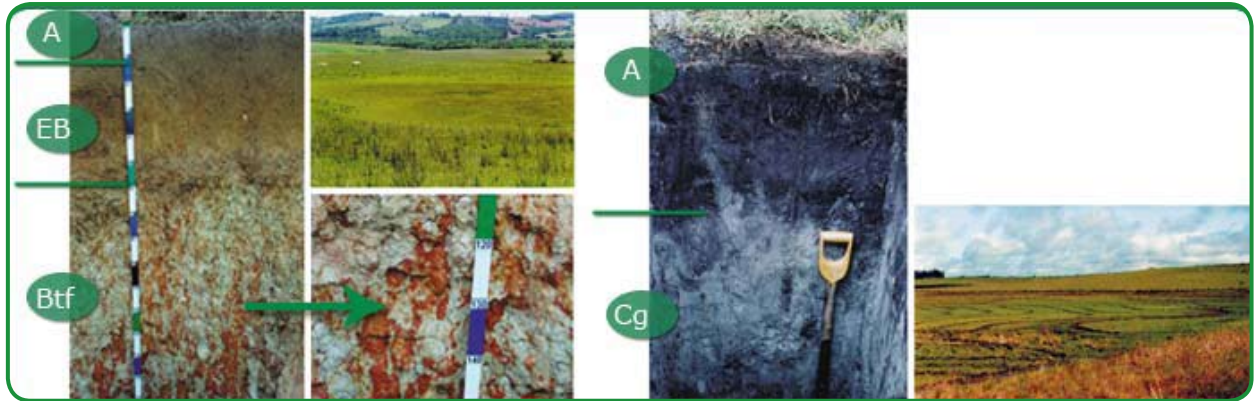
Esse fato gera duas conseqüências importantes para a gênese do solo: o aumento na concentração de agentes complexantes orgânicos e a maior abundância de elétrons no meio, havendo, primeiramente, uma redução intensa de nitrogênio e, subseqüentemente, de ferro e manganês.

Com isso, esses elementos são transportados para fora do perfil, e como os principais agentes pigmentantes são os óxidos e a matéria orgânica, os horizontes superficiais ficam com coloração acinzentada, que é a coloração típica dos outros argilominerais que permanecem no perfil. Assim, a coloração acinzentada no perfil é um forte indicativo de



drenagem lenta ou impedida.

Nesse processo, ocorre a formação de horizonte glei (Bg ou Cg) ou plíntico (Bf), sendo típico das classes de solo Gleissolos e Plintossolos (Figura D.11), respectivamente. Solos dessas classes são normalmente usados no Rio Grande do Sul, para a cultura do arroz irrigado por inunda-ção.



**Figura D.11** - Perfil de um Plintossolo (à esquerda) e de um Gleissolo (à direita), com a identificação do horizonte plíntico (Btf) e glei (Cg), respectivamente. Veja que ambos os solos ocorrem em posições mais baixas do relevo, com influência do lençol freático e indícios de má drenagem.

Fonte: Fotos de Streck et al. (2002).

## 4. Aplicações

Elementos da paisagem (relevo, vegetação, rochas) contribuem na demarcação dos limites de tipos de solos. Os processos de formação atuam constantemente no tempo, mas em taxas muito mais lentas do que a degradação antrópica, mostrando a necessidade do manejo racional dos recursos naturais, incluindo solo e água.

A visualização de propriedades do solo permite identificar processos gerais e específicos de formação do solo. Isso contribui para sabermos da história e prevermos o futuro do solo para distintos cenários ambientais, bem como para inferir sobre as limitações do solo e a sua vocação de uso.

A avaliação das condições agrícolas das terras é realizada em função de um conjunto de fatores agrícolas, sendo que cada um dos fatores é avaliado quanto ao grau de limitação, podendo ser: nulo, ligeiro, moderado, forte ou muito forte. Os fatores agrícolas usados nessa avaliação constam na Figura D.12.



<b>Fertilidade natural</b>	Está na dependência da disponibilidade de macro e micronutrientes, e na presença ou ausência de certas substâncias tóxicas, como alumínio e manganês trocáveis.
<b>Erosão</b>	É definida em relação ao desgaste que a superfície do solo poderá sofrer quando submetida a qualquer tipo de utilização sem práticas conservacionistas. A suscetibilidade à erosão está na dependência das condições climáticas, das condições do solo - textura, estrutura, permeabilidade, profundidade, capacidade de retenção de água, seqüência de horizontes, presença ou ausência de camadas compactas e pedregosidade, das condições de relevo (declividade, extensão das pendentes e micro relevos) e da cobertura vegetal.
<b>Falta d'água</b>	É definida pela quantidade de água armazenada no solo disponível para as plantas. Esta condição depende do clima e das condições do solo (capacidade de retenção e armazenamento de água), que são dependentes da textura, tipo de argila, conteúdo de matéria orgânica, profundidade efetiva.
<b>Falta de ar</b>	Esta característica está normalmente relacionada com as classes de drenagem do solo: mal a muito mal drenado, que por sua vez são resultantes da interação da precipitação, evapotranspiração, posição no relevo e características do solo.
<b>Uso de implementos agrícolas</b>	Refere-se às condições apresentadas pelas terras ao uso de máquinas e implementos agrícolas. Está relacionado com a extensão, forma e declividade das pendentes, com as condições de drenagem, com a espessura, textura e tipo de argila predominante no solo e com a pedregosidade e rochiosidade superficial.

**Figura D.12** - Fatores agrícolas utilizados para avaliação das condições agrícolas das terras.

Vejamos um exemplo. Para o solo da Figura B.11, os graus de limitação ao uso agrícola seriam os seguintes:

- a.** Fertilidade natural: Não podemos avaliar, pois nos faltam os dados químicos do solo. Isso será estudado na Unidade E;
- b.** Erosão: forte a muito forte. Solos muito susceptíveis à erosão devido ao relevo;
- c.** Falta d'água: moderada, possuem baixa capacidade de retenção de água;
- d.** Falta de ar: nula. Solos bem drenados, porosos e profundos;
- e.** Uso de implementos agrícolas: forte a muito forte, devido ao relevo, rochiosidade e pedregosidade;

## 5. Atividades finais

### ATIVIDADE

**Atividade D4, D5 e D6** - Para realizar a atividade, entre em contato com o professor da disciplina.

## 6. Bibliografia

### 6.1. Bibliografia básica da Unidade D

BRASIL, Ministério da Agricultura. Divisão de Pesquisas Pedológicas. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Rio Grande do Sul.** Recife: EMBRAPA, 1973. 431 p. (Boletim Técnico N° 30)

BUOL, S.W.; HOLE, F.D.; MCCRAKEN, R.J. **Soil genesis and classification.** Iowa, USA: The Iowa State University Press, 1973. 360p.

DEPARTAMENTO DE SOLOS. **Apostila de morfologia e gênese do solo.** Santa Maria: UFSM, sem data. 152p.

JUMA, N. **The pedosphere and its dynamics: A systems approach to soil science. V.1. Introduction to soil science and soil resources.** Edmonton, Canadá: Salman Productions, 1999. 315p.

LEMOS, R.C. de; SANTOS, R.D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo.** 4ª. ed. Viçosa: SBCS, 2002. 83 p.

STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D. et al. **Solos do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre: Emater/RS & UFRGS, 2002. 126 p.

### 6.2 - Bibliografia complementar da Unidade D

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **The nature and properties of soils.** 11 ed. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1996. 740p.

PEDRON, F.A.; AZEVEDO, A.C. de; DALMOLIN, R.S.D.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. **Principais solos da região da Quarta Colônia, Rio Grande do Sul: guia de excursão.** Santa Maria: Departamento de Solos, UFSM, 2007. 41p.

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; DALMOLIN, R.S.D.; AZEVEDO, A.C. de; PEDRON, F.A. **Principais solos da Depressão Central e Campanha do Rio Grande do Sul: guia de excursão.** 2ª. ed. Santa Maria: Departamento de Solos-UFSM, 2007. 47p.

## UNIDADE E

### Propriedades Químicas do Solo

#### Introdução

O solo, como sistema trifásico (sólido, aquoso e gasoso), com diferentes constituintes na fase sólida, apresenta um grande número de propriedades químicas próprias. A sede dos fenômenos químicos e físico-químicos do solo é a fração argila, pois se trata de um sistema coloidal. A fração coloidal do solo é bastante heterogênea, constituindo-se de partículas de diferentes espécies minerais (argilominerais e óxidos), de partículas orgânicas (húmus) e de compostos organominerais (associação de argilominerais, óxidos e húmus). Nos colóides inorgânicos, você verá que existem dois tipos de cargas: (a) as permanentes, oriundas da substituição isomórfica no momento da formação do mineral e (b) as cargas variáveis, que se localizam nas arestas quebradas (final das lâminas tetraedrais e octaedrais) dos minerais e podem ser carregadas positivamente, ser neutras ou ser carregadas negativamente, dependendo da constituição da solução que as circunda. Em função da presença de cargas elétricas, o solo é um verdadeiro armazém de íons e moléculas.

#### Objetivos

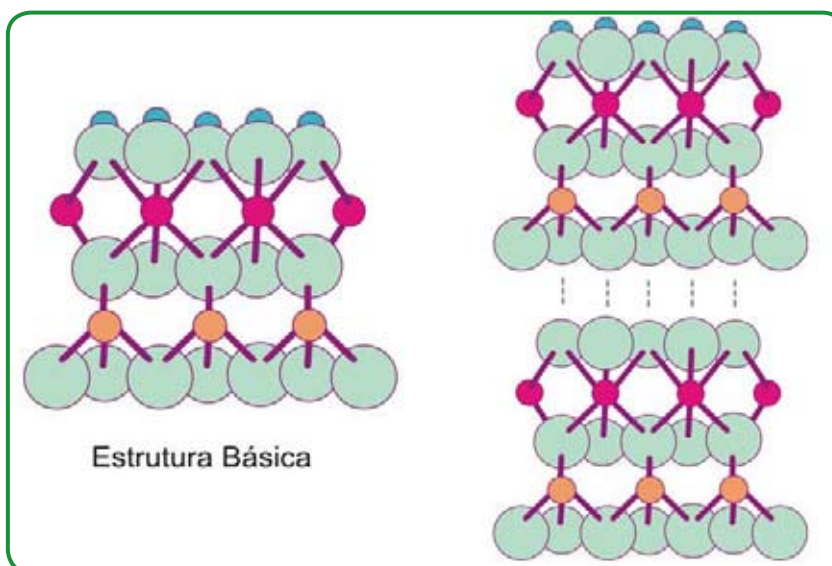
A presente unidade tem por objetivos:

- caracterizar um colóide do solo;
- compreender a origem das cargas elétricas do solo;
- entender como a fração coloidal do solo armazena nutrientes essenciais e elementos tóxicos;
- caracterizar os diferentes tipos de acidez do solo;
- relacionar as propriedades de superfície ao fenômeno de floculação e dispersão do solo.

## 1. Fração coloidal do solo

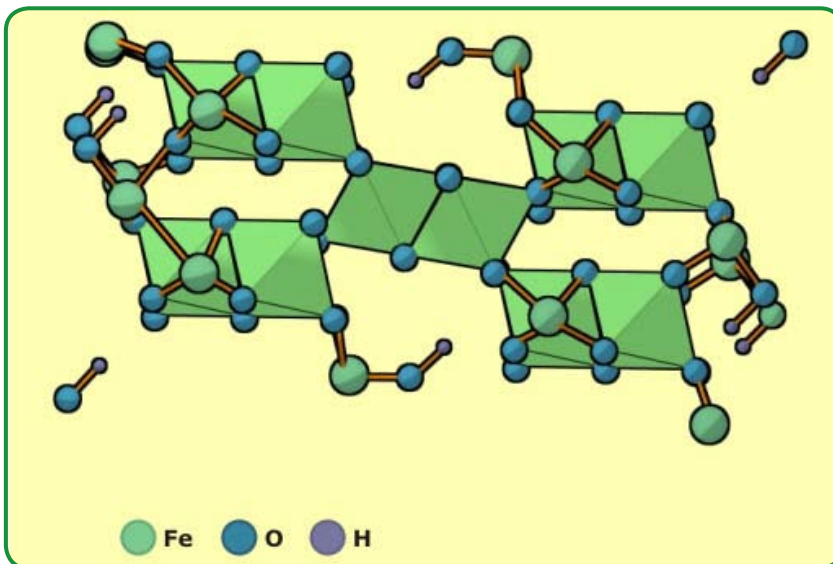
A fim de melhor compreender os fenômenos de superfície da fração coloidal do solo, faz-se necessário retomar algumas informações estudadas na Unidade C (Composição do Solo). A fração coloidal do solo (partículas e substâncias muito pequenas = fração argila) é composta por três conjuntos de colóides:

**a. Argilominerais (Figura E.1):** os argilominerais são constituídos de arranjos de lâminas tetraedrais (Si e Al) e octaedrais (Al, Fe, Mg, Mn e Ca). Na formação desses minerais de argila, ocorreram algumas imperfeições (substituição isomórfica), tornando-os eletricamente desbalanceados – cargas elétricas negativas permanentes (você verá maiores informações na seqüência desta unidade). Nos solos brasileiros e, em especial, nos solos gaúchos, nós podemos encontrar argilominerais ainda jovens (2:1, duas lâminas tetraedrais e uma lâmina octaedral central) e argilominerais mais velhos, que perderam uma lâmina tetraedral. Em ambos os tipos de argilominerais e, em especial, nos 1:1, aparecerão as cargas elétricas variáveis. Os solos podem apresentar ampla variação na quantidade de argilominerais. Solos originários de materiais arenosos dificilmente contêm mais de 15% de argilominerais; solos derivados de granito apresentam, geralmente, de 10 a 30% de argilominerais; e solos derivados de basalto apresentam altos teores de argilominerais, podendo ultrapassar os 90%.



**Figura E.1** - Representação de uma camada 1:1 (octaedral + tetraedral) na esquerda e da união de duas camadas 1:1 formando uma caulinita.

**b. Óxidos (Figura E.2):** os óxidos são frutos do intenso intemperismo do solo. Houve uma altíssima dessilicação do sistema e sobraram apenas os octaedros. Desse modo, podemos considerar que não há carga permanente nos óxidos. A superfície dos óxidos, especialmente os de ferro, está quase sempre carregada positivamente (cargas elétricas variáveis). Em função disso, os óxidos são grandes adsorventes de ânions, como é o caso do fosfato e do sulfato. Os óxidos mais comuns, nos solos gaúchos, são os de ferro (goethita, hematita, ferrihidrita e lepidocrocita), os de alumínio (gibbsite) e os de manganês (pirolusita). Solos jovens apresentam muito baixo teor de óxidos, como é o caso do solo Escobar. Contrariamente, solos mais intemperizados, como os do Planalto do RS, apresentam grandes quantidades de óxidos, especialmente os de ferro.

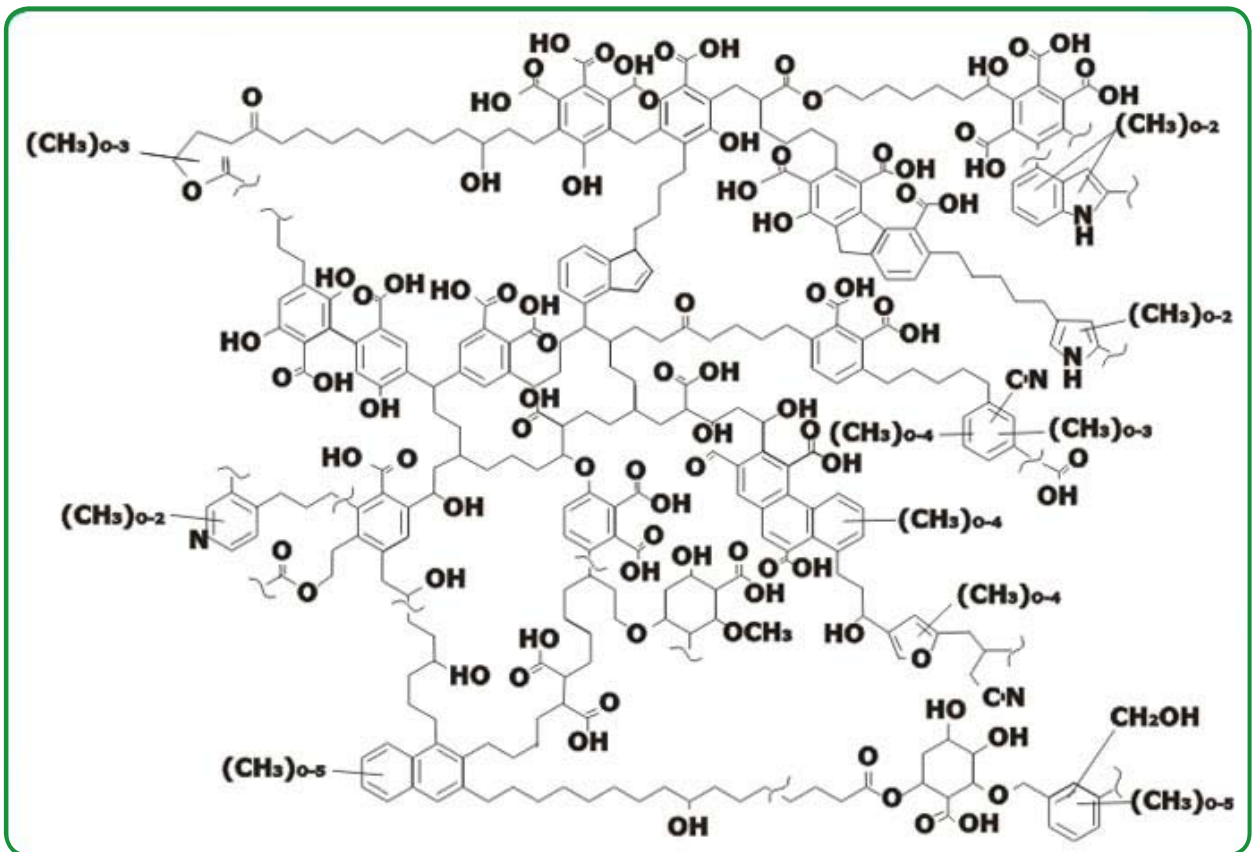


**Figura E.2** - Representação do óxido de ferro goethita. Veja que as lâminas de octaedros deixam espaços internos (túneis) em que podem ser adsorvidos ânions e até metais pesados catiônicos.

**c. Húmus (Figura E.3):** o húmus é a parte coloidal da matéria orgânica e é composto de substâncias orgânicas com alto grau de complexidade química. É fruto da decomposição e síntese microbiana a partir dos resíduos vegetais (fotossíntese). Resíduos vegetais ricos em lignina são decompostos mais lentamente e são a base do húmus, enquanto resíduos ricos em outros tipos de açúcares e em compostos nitrogenados são facilmente decompostos em gás carbônico e água, liberando nutrientes e energia para o meio. O húmus pode ser dividido em laboratório por diferentes técnicas. A técnica mais usada consiste em fracioná-lo em ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e huminas. No húmus,



existem vários grupos funcionais, sendo que os mais abundantes e importantes nos fenômenos de superfície são os carboxílicos e fenólicos. Todos os grupos funcionais presentes no húmus podem estar positiva ou negativamente carregados. Nas condições normais de cultivo de nossos solos, os grupos funcionais estão carregados negativamente e, por isso, a matéria orgânica é responsável pela maioria das cargas negativas do solo. Os teores de matéria orgânica do solo são dependentes das condições climáticas, das taxas de adição e decomposição e dos teores de argila. Nos solos arenosos ocorrentes no Rio Grande do Sul, os teores de matéria orgânica dificilmente ultrapassam os 2%; os solos derivados de basalto (altos teores de argila) naturalmente apresentam de 2 a 5% de matéria orgânica.



**Figura E.3** - Representação de uma molécula de húmus (fração coloidal da matéria orgânica) (Schintzer, 1993). Veja a grande quantidade de anéis aromáticos e a exposição de diferentes grupos funcionais contendo oxigênio.

## 2. Área superficial específica

A área superficial específica é a superfície das partículas por unidade de massa (expresso em  $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ ). As partículas coloidais caracterizam-



se por apresentar uma alta superfície específica. A superfície específica determina a amplitude das reações entre a fase sólida e as fases líquidas e gasosas. A área superficial específica varia em função do tamanho e do tipo dos minerais.

A Tabela E.1 ilustra o aumento da superfície específica, à medida que um cubo de um grama é subdividido em partículas da mesma forma, com arestas menores. Nota-se que um grama de argila poderá apresentar superfície específica cerca de mil vezes maior que um grama de areia. O exemplo acima demonstra que a superfície é inversamente proporcional ao diâmetro das partículas.

Classe de tamanho	Composição Mineralógica	Diâmetro (mm)	A.S.E. ( $m^2 g^{-1}$ )
Areia Grossa	Quartzo	2,0 - 0,2	0,01
Areia Fina	Quartzo	0,2 - 0,05	0,1
Silte	Minerais 1º	0,05 - 0,002	1
Argila	Minerais 2º	< 0,002	5 - 800*

Figura E.4 - Relação entre tamanho das partículas e superfície específica.

No solo, as diferenças são, em geral, maiores do que as do exemplo mostrado na Tabela E.1. Os argilominerais 2:1 expansivos, como a montmorilonita, além de superfícies externas apresentam superfícies internas situadas entre as camadas desses minerais (Figura E.5). Assim, sua superfície específica é maior do que a dos argilominerais não-expansivos, como a caulinita, que tem apenas superfícies externas. A ferrihidrita, por exemplo, apresenta alta área superficial específica (200 a 500  $m^2 g^{-1}$ ) e sua reorganização e desidratação dá origem a goethita, cuja forma é acicular e tem menor área superficial específica, em relação a ferrihidrita (60 a 200  $m^2 g^{-1}$ ), mas superior em relação à hematita.

### ATIVIDADE

**Atividade E1** - Para realizar a atividade, entre em contato com o professor da disciplina.

## 3. Grupos funcionais (reativos) da fração coloidal do solo

A reatividade dos colóides de origem orgânica, inorgânica ou sua associação ocorre devido à presença de grupos funcionais. Grupos funcionais são estruturas químicas que expõem átomos ou grupos de

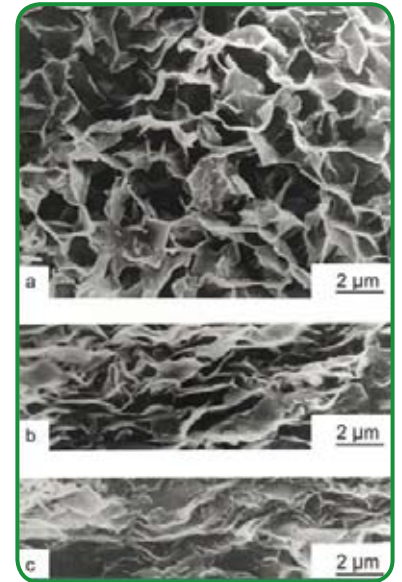
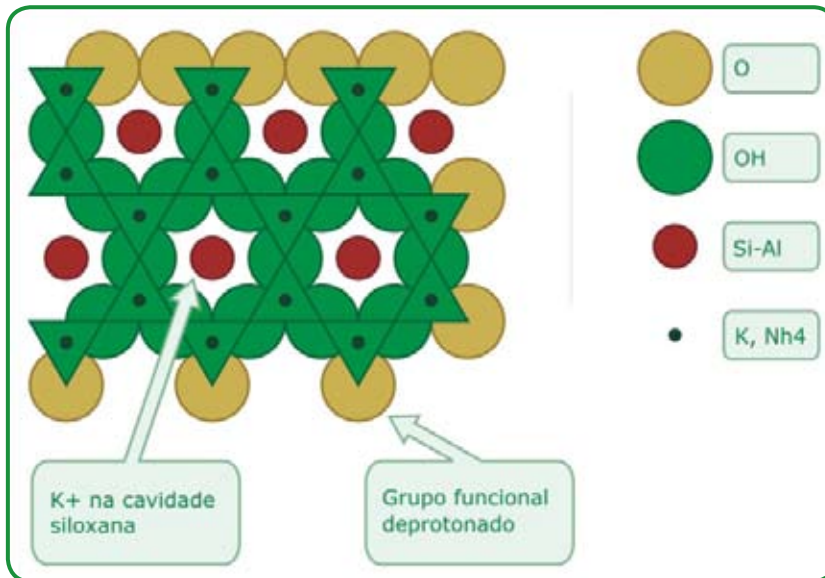


Figura E.5 - Microscopia eletrônica de uma montmorilonita com diferentes teores de umidade: (a) saturada com água, (b) 50% da capacidade de retenção e (c) amostras secas em estufa (Tessier – PESSAC-INRA). Veja a enorme quantidade de superfície interna na amostra úmida.

átomos instáveis quimicamente e, quando em contato com a solução do solo, reagem com íons ou moléculas para diminuir suas **energias livres**. Os grupos funcionais são formados durante a gênese dos argilominerais (substituição isomórfica), pela exposição terminal dos tetraedros e octaedros e pelas superfícies externas das substâncias húmicas. Os grupos funcionais permanentes (cargas negativas permanentes) têm sua reatividade independente da condição geoquímica (Figura E.6).



**Figura E.6** - Lâmina tetraedral de uma argila vista de cima, mostrando íons de potássio na cavidade siloxana.

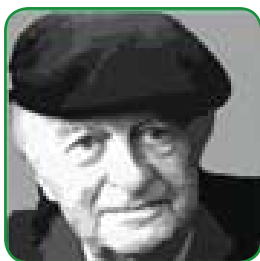
Os outros grupos funcionais são todos formados pela exposição superficial dos colóides no meio aquoso. No caso dos argilominerais, os átomos das bordas quebradas das lâminas apresentam um desequilíbrio no número de coordenação do cátion (Si e Al) e no número de prótons ligados ao ânion coordenador (O), gerando os dois principais tipos de grupos funcionais, o *silanol* (Si-O e Si<sub>2</sub>-O) e o *aluminol* (Al-O e Al<sub>2</sub>-O). O mesmo princípio é aplicado aos óxidos, cujos oxigênios ligados aos cátions (Fe, Al, Mn e Ti), expostos superficialmente, são considerados grupos funcionais.

A reatividade desses grupos funcionais depende da relação entre a valência do cátion e o número de coordenação (Valência de **Pauling**), do número do metal que o oxigênio está ligado (mono, di e tricoordenado) e do plano de exposição do grupo funcional no mineral.

## **AE** GLOSSÁRIO

**Energia livre de Gibbs (G)** é a quantidade de energia capaz de realizar trabalho durante uma reação à temperatura e pressão constantes. Ela determina a espontaneidade de uma reação. A equação que calcula a variação da energia livre é  $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$ , em que  $\Delta H$  é a variação de entalpia,  $T$  é a temperatura absoluta e  $\Delta S$  é a variação de entropia. Em sistemas onde o  $\Delta G > 0$ , houve absorção de energia, por isso não são espontâneos, e onde  $\Delta G < 0$ , houve liberação, ou seja, são espontâneos. Resumindo,  $\Delta G > 0$  reação não espontânea,  $\Delta G < 0$ , reação espontânea, e quando  $\Delta G = 0$ , a reação está em equilíbrio. A energia livre de Gibbs tende sempre a diminuir, ou seja, a reação tende a atingir o estado de equilíbrio,  $\Delta G = 0$ . Uma situação semelhante é a que ocorre com os valores da Energia Potencial, por exemplo, uma bola caindo de um plano inclinado. A energia potencial, à medida que a bola vai perdendo altitude, vai tendendo a zero. ([http://pt.wikipedia.org/wiki/Energia\\_livre](http://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_livre))

#### **i** PERSONALIDADE



Linus Carl Pauling (28 de Fevereiro de 1901 - Portland, em Oregon, nos Estados Unidos / 19 de Agosto de 1994 - Big Sur, Califórnia) foi um químico norte-americano. Linus Pauling é a única personalidade a ter conquistado dois prêmios Nobel sozinho (Marie Curie também ganhou dois, mas um deles foi partilhado). Ganhou o prêmio de Química em 1954, "por sua pesquisa sobre a natureza da ligação química e sua aplicação à elucidação da estrutura das substâncias complexas", e o Nobel da Paz em 1962, por tentar proibir o uso das armas nucleares. Quando ganhou o prêmio Nobel de Química, era pesquisador no Instituto de Tecnologia da Califórnia, em Pasadena. Inventou o diagrama que leva o seu nome, responsável por mostrar a distribuição eletrônica nos diferentes níveis e subníveis dos átomos ([http://pt.wikipedia.org/wiki/Linus\\_Pauling](http://pt.wikipedia.org/wiki/Linus_Pauling)).

Didaticamente, na Figura E.7, são apresentadas as valências de Pauling e a carga residual do oxigênio dos principais grupos funcionais. Observa-se, por exemplo, que a valência de Pauling é 1,0 para o Si; 0,66 para o Mn e Ti; e 0,5 para o Al e Fe, resultando que o oxigênio é ligado mais energeticamente ao Si do que ao Fe e ao Al. Conseqüentemente, a energia de ligação do hidrogênio no grupo silanol é mais fraca, facilitando a dissociação e gerando carga negativa. Contrariamente, nos outros grupos funcionais, o oxigênio é fracamente ligado ao metal, aumentando a energia da ligação com o hidrogênio e, por conseqüência, se tornando mais fácil o deslocamento de todo o grupo funcional (OH ou OH<sub>2</sub><sup>+</sup>) por um outro ânion, ligando-se diretamente ao metal da superfície do mineral. As **constantes de dissociação** dos prótons são sempre inferiores para o grupo funcional silanol (Si-O) (pK<sub>1</sub> < 2 et pK<sub>2</sub> 6-7), seguida do Mn-O (pK<sub>1</sub> < 3-4 et pK<sub>2</sub> 7-9) e finalmente o Fe-O et Al-O (pK<sub>1</sub> 5-7 et pK<sub>2</sub> 8-10), e isso justifica os valores do ponto de carga zero (pcz) dos principais minerais portadores desses grupos funcionais. Assim, o pcz do quartzo (Si-O) e da birnesita (Mn-O) é menor do que 2 ; o da caulinita (Si-O + Al-O) é de aproximadamente 4,5 ; o da goethita (Fe-O) é mais ou menos 6,0 e o do corondon (Al-O) é de 9,0. Além das diferentes constantes de dissociação, o oxigênio de todos os grupos funcionais pode estar ligado a um [Fe-OH(H)] – monocoordenado, dois [Fe<sub>2</sub>OH(H)] – bicoordenado ou três metais [Fe<sub>3</sub>O(H)] – tricoordenado. Geralmente, no pcz do mineral, os grupos funcionais monocoordenados estão protonados e, nos tricoordenados, estão deprotonados, pois os oxigênios estão mais estabilizados quimicamente.

#### **+** SAIBA MAIS

Considerando a equação:

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} = K_e$$

, K<sub>e</sub> é a constante de equilíbrio, e seu valor só é constante a uma temperatura determinada. Variando-se a temperatura, o valor da constante se altera. A partir do valor de K<sub>e</sub>, pode-se ter uma idéia do rendimento de uma reação: um valor grande de K<sub>e</sub> indica um alto rendimento, já que, pela definição, K<sub>e</sub> é a relação entre as concentrações dos produtos e as concentrações dos reagentes; logo, quanto maior o valor de K<sub>e</sub>, maior deverá ser o valor do numerador (produtos) em relação ao denominador (reagentes). Isso significa que a quantidade dos produtos formada no final da reação (equilíbrio) é superior à de reagentes remanescentes. (<http://br.geocities.com/chemicalnet/quali/equilibrio.htm>)

Metal	Grupo Funcional	Valência Pauling	Carga sobre o Oxigênio	Carga residual		
				-O	-OH	-OH <sub>2</sub>
Si	Si-O	4/4 = 1,0	1,0	-1	0	+1
	Si <sub>2</sub> -O		2,0	0	+1	+2
Mn e Ti	Mn-O et Ti-O	4/6 = 0,66	0,66	-1,33	-0,33	+0,66
	Mn <sub>2</sub> -O et Ti <sub>2</sub> -O		1,33	-0,66	+0,33	+1,33
	Mn <sub>3</sub> -O et Ti <sub>3</sub> -O		2,00	0	+1	+2
A	Al-O et Fe-O	3/6 = 0,5	0,5	-1,5	-0,5	+0,5
	Al <sub>2</sub> -O et Fe <sub>2</sub> -O		1,0	-1	0	+1
	Al <sub>3</sub> -O et Fe <sub>3</sub> -O		1,5	-0,5	+0,5	+1,5

**Figura E.7** - Grupos funcionais, valência de Pauling, carga sobre o oxigênio e carga residual.

Os principais grupos funcionais da matéria orgânica (ver Figura E.3) são os carboxílicos (R-COOH) e fenólicos (Anel-OH), mas também existem os carbonílicos (R-C=O), alcoólicos (R-CH<sub>2</sub>-OH), amínicos (R-NH<sub>2</sub>), amídicos (R-CO-NH<sub>2</sub>), aldeídicos (R-COH), cetônicos (R-CO-R), ésteres (R-COO-R) e tióis (R-SH). A quantidade de grupos funcionais carboxílicos é maior nos ácidos fúlvicos (5,2 a 11,2 mol kg<sup>-1</sup>) do que nos ácidos húmicos (1,5 a 6,0 mol kg<sup>-1</sup>).

### ATIVIDADE

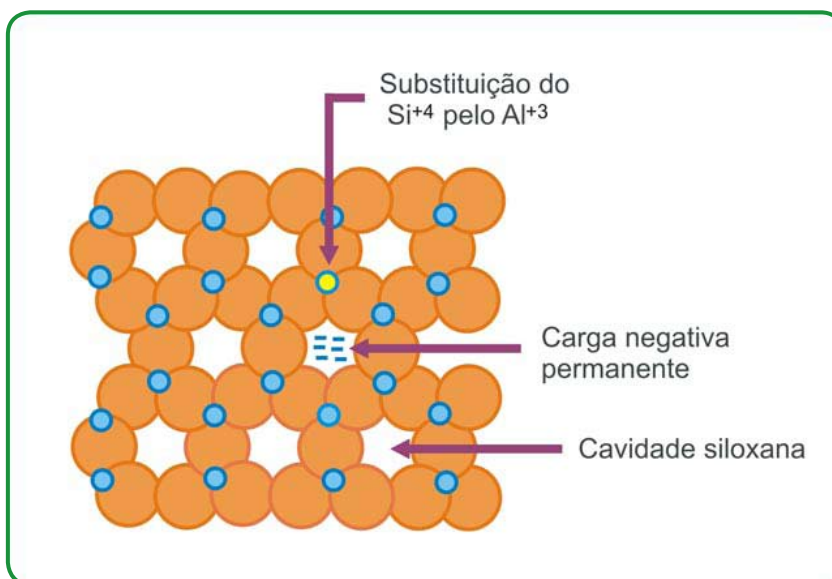
**Atividade E2** - Para realizar a atividade, entre em contato com o professor da disciplina.

## 4. Cargas elétricas

Em geral, as partículas coloidais expõem seus grupos funcionais ao meio líquido polar (água do solo) e podem expressar o desbalanço eletrônico na forma de cargas elétricas. As cargas elétricas dos colóides podem ser negativas ou positivas. As cargas negativas existentes no solo podem ser classificadas em cargas permanentes e cargas dependentes do pH.

As cargas elétricas permanentes somente são significativas em argilominerais 2:1 (montmorilonita, vermiculita e ilita, entre outros). Nós as

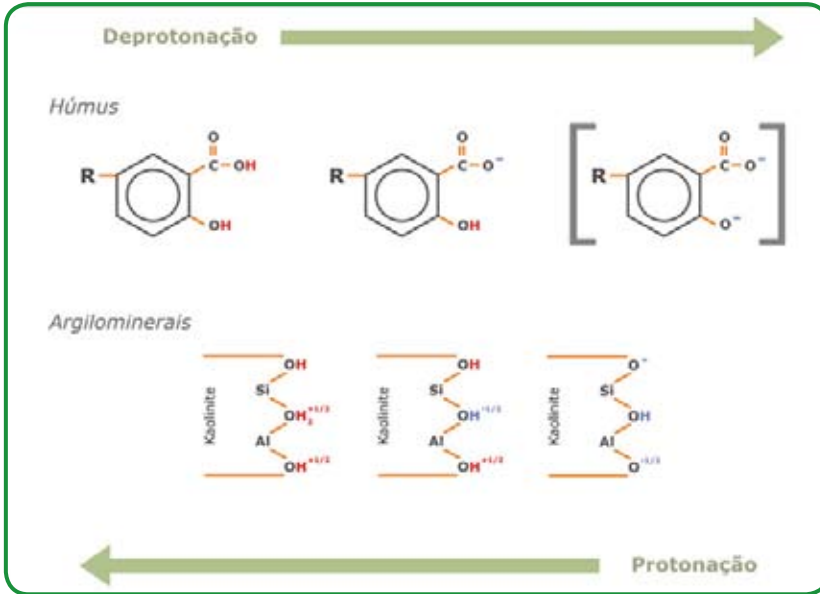
consideramos cargas elétricas permanentes porque elas são originárias da imperfeição durante a formação e estão localizadas no interior da rede cristalina do mineral (Figura E.6). Na lâmina tetraédrica, alguns átomos de  $\text{Si}^{+4}$  são substituídos por átomos de  $\text{Al}^{+3}$ . O mesmo fenômeno ocorre na lâmina octaédrica, cuja substituição isomórfica mais comum é a do  $\text{Al}^{+3}$  pelo  $\text{Mg}^{+2}$ . A menor valência do Al e Mg em relação ao Si e Al, respectivamente, dá origem ao déficit de cargas positivas, que se traduz no maior número de cargas negativas na partícula, que se distribuem em todos os átomos de oxigênio vizinhos. Este tipo de carga é mais comum nas argilas 2:1 expansivas.



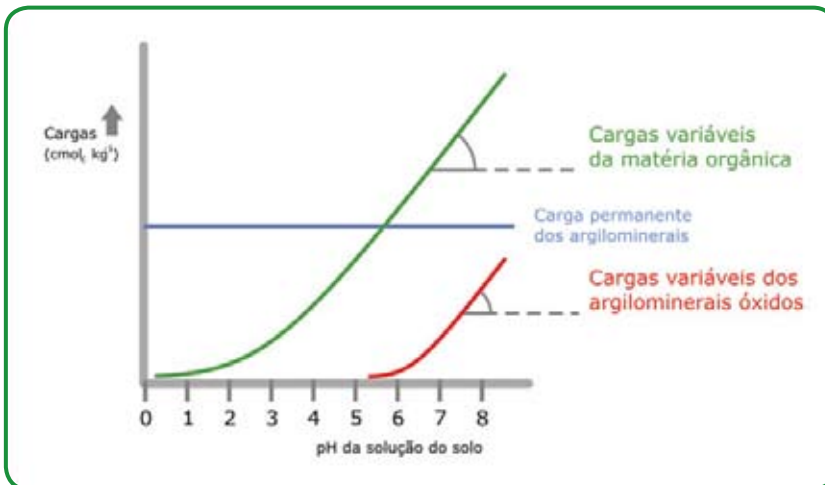
**Figura E.8** - Representação da substituição isomórfica na estrutura dos argilominerais.

As cargas negativas dependentes de pH encontram-se nas bordas dos argilominerais (grupos funcionais silanol e aluminol), na superfície dos óxidos e da matéria orgânica (Figura E.7). Elas ocorrem em maior quantidade em solos tropicais, solos estes que, em sua maioria, possuem argilas do tipo 1:1 e óxidos de Fe e Al no sistema coloidal. Nesses solos, como a quantidade de cargas permanentes é muito baixa, a matéria orgânica passa a ser a fonte principal de cargas negativas, especialmente quando o solo é ácido ( $\text{pH} < 5,5$ ) (Figura E.9). O aumento dessas cargas com o pH tem grande importância prática em termos de acidez potencial, disponibilidade de nutrientes e de elementos tóxicos e nos fenômenos de dispersão e floculação do solo.





**Figura E.9** - Origem das cargas elétricas negativas dependentes do pH no húmus e nos argilominerais.



**Figura E.10** - Relação entre o pH da solução do solo e a variação nas cargas negativas (permanentes e dependentes do pH).

## ATIVIDADE

**Atividade E3** - Para realizar a atividade, entre em contato com o professor da disciplina.

## 5. Retenção de íons

Parte dos elementos químicos presentes no material de origem é mantida no solo. Logicamente o solo, por ser um sistema aberto, é o caminho intermediário entre o material de origem e os ambientes



aquáticos e a atmosfera. Os elementos químicos são mantidos no solo por diferentes mecanismos:

- a. fazendo parte da estrutura dos minerais (O, Si, Al e Fe, principalmente);
- b. fazendo parte da estrutura da matéria orgânica (C, O, N, S, H, B e P, principalmente); ou
- c. retidos na forma de íons pelo sistema coloidal do solo (argilominerais, óxidos e matéria orgânica).

A retenção de íons (cátions e ânions) no solo se dá graças à presença dos grupos funcionais e suas cargas elétricas. Didaticamente, nós dividimos a retenção de íons em **adsorção** de cátions e adsorção de ânions.

### 5.1. Adsorção de cátions

Os cátions podem ser adsorvidos por dois mecanismos:

- a. adsorção específica por meio de ligações químicas de alta energia. Esse mecanismo é bastante complexo e será tratado com mais detalhes na disciplina de Fertilidade do Solo. É o mecanismo presente na retenção de cobre, de zinco, de grande parte do alumínio e de parte do potássio, quando em presença de argilominerais 2:1.
- b. adsorção não específica ou adsorção física. Os cátions permanecem hidratados e são atraídos pelas cargas negativas dos colóides do solo. A grande maioria do  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  e  $\text{Mg}^{+2}$  disponíveis às plantas são adsorvidos fisicamente. Por isso, eles podem ser trocados por outros cátions, e o fenômeno é tratado como adsorção e troca de cátions. Já a quantidade de cátions que um solo pode reter é chamada de capacidade de troca de cátions.

Inicialmente, eu gostaria que vocês refletissem um pouco sobre as três afirmativas seguintes:

- a. a propriedade de troca de cátions é considerada quase tão importante para os ecossistemas quanto a fotossíntese;
- b. sem a propriedade de troca de cátions os ecossistemas terrestres provavelmente não existiriam;
- c. todo profissional de Ciências Agrárias e Ambientais deve entender como a propriedade de troca de cátions funciona, para evitar alguns desastres.

As propriedades de adsorção e troca de íons do solo resultam basicamente da interação entre a fase líquida e a fase sólida coloidal do

## AE GLOSSÁRIO

**Adsorção** é a adesão de moléculas de um fluido (o adsorvido) a uma superfície sólida (o adsorvente); o grau de adsorção depende da temperatura, da pressão e da área da superfície - os sólidos porosos como o carvão são ótimos adsorventes. As forças que atraem o adsorvato podem ser químicas ou físicas. A adsorção química, também chamada de quimissorção, é específica e é empregada na separação de misturas. Nela, as moléculas (ou átomos) unem-se à superfície do adsorvente através da formação de ligações químicas (geralmente covalentes) e tendem a se acomodar em sítios que propiciem o maior número de coordenação possível com o substrato. Uma molécula quimicamente adsorvida pode ser decomposta em virtude de forças de valência dos átomos da superfície, e é a existência de fragmentos moleculares adsorvidos que responde, em parte, pelo efeito catalítico das superfícies sólidas. A adsorção física, também chamada de fisissorção, é empregada em máscaras contra gases e na purificação e descoloração de líquidos. Nela, as moléculas do adsorvente e do adsorvato interagem por interações de van der Waals, que apesar de serem interações de longo alcance, são fracas e não formam ligações químicas. Uma molécula fisicamente adsorvida retém sua identidade, embora possa ser deformada pela presença dos campos de força da superfície (<http://pt.wikipedia.org/wiki/Adsor%C3%A7%C3%A3o>).

solo. Denomina-se adsorção e troca de íons o processo reversível pelo qual os íons da solução do solo são adsorvidos pelas partículas coloidais, deslocando outros previamente adsorvidos e de carga elétrica de mesmo sinal. O fenômeno de adsorção é, sem dúvida, o evento físico-químico de maior importância no solo. Graças à adsorção, os nutrientes podem permanecer no solo em forma disponível às plantas mas, ao mesmo tempo, essa retenção é suficientemente forte para impedi-los de serem carregados pelas águas que se infiltram no solo. As cargas elétricas apresentadas pelos colóides do solo são responsáveis pela adsorção de íons. Normalmente, predominam as cargas negativas nos colóides do solo.

Os cátions da fase líquida (solução do solo) estão em equilíbrio com os cátions adsorvidos aos colóides. A retirada dos cátions da fase líquida provocará uma reposição a partir da liberação de cátions adsorvidos, tendendo a se refazer o equilíbrio. Os cátions da solução existem em quantidades bem menores do que aqueles adsorvidos na fase sólida (Tabela E.3).

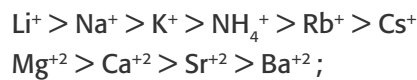
Solo	Cátion	Cátion trocável	Cátion na solução	% na solução
		cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>		
Escobar (Vertissolo) Solo jovem	Ca <sup>+2</sup>	37,74	0,082	0,21
	Mg <sup>+2</sup>	5,81	0,028	0,48
	K <sup>+</sup>	0,18	0,005	2,77
	Na <sup>+</sup>	0,18	0,036	20,00
Passo Fundo (Latosolo) Solo velho	Ca <sup>+2</sup>	3,27	0,060	1,89
	Mg <sup>+2</sup>	1,83	0,050	3,29
	K <sup>+</sup>	0,15	0,010	6,66
	Na <sup>+</sup>	0,05	0,008	16,00

**Figura E.11** - Cátions trocáveis e na solução em dois solos com diferentes tipos de argila. (Disciplina de Química do Solo – UFSM, Morelli, 1981).

Os diversos fatores que influem na adsorção e na troca e íons serão relatados brevemente, visando a uma maior compreensão do fenômeno de adsorção e troca.

**a.** valência do cátion: quanto maior a valência, mais fortemente adsorvido será o cátion. O  $H^+$  é fortemente adsorvido, comportando-se como se fosse um cátion polivalente;

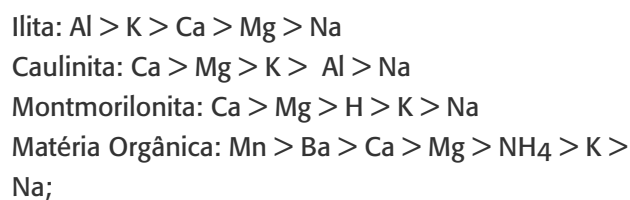
**b.** hidratação do íon: quanto maior o grau de hidratação, menos fortemente o cátion será adsorvido. A seguir, apresenta-se a seqüência de hidratação de cátions mono e divalentes, em que, diminuindo-se a hidratação, aumenta-se a força de adsorção. Assim, o céσιο e o bário são os cátions mais fortemente adsorvidos, se comparados aos demais cátions mono e divalentes, respectivamente.



**c.** concentração da solução do solo: a concentração de um cátion na solução do solo provocará uma maior adsorção daquele, deslocando os demais cátions adsorvidos que estejam em menor concentração. Esse fator é muito usado na realização de análises químicas do solo (análise da CTC, bases trocáveis e alumínio trocável);

**d.** tamanho do cátion: quanto maior o cátion, mais fortemente o mesmo será adsorvido;

**e.** seletividade do colóide: certos colóides evidenciam maior preferência para a adsorção de certos cátions, conforme apresentando abaixo:



**f.** cátion complementar: a substituição de um determinado cátion adsorvido (x) por um outro (y) depende também da quantidade de outros que estejam adsorvidos ou em solução. A discussão desse item foge ao objetivo da disciplina.

Os fatores relatados explicam porque existem mais Ca e Mg que K e Na nos dados apresentados anteriormente para os solos Escobar e Passo Fundo (Tabela E.3). Explicam também porque as porcentagens na solução do solo são menores para o Ca e Mg que para o K e Na. O fato de o solo Passo Fundo ter maior porcentagem de Ca e Mg na solução do solo, em comparação com o Escobar, demonstra a menor seletividade do sistema coloidal daquele solo (óxidos e caulinita) por esses cátions, em relação ao sistema coloidal do solo Escobar (mont-

morilonita).

A capacidade de troca de cátions (CTC) representa a medida do poder de adsorção e troca de cátions do solo. A CTC é a quantidade de cátions que um solo é capaz de reter por unidade de peso. Constitui-se numa propriedade fundamental para a caracterização do solo e avaliação de sua potencialidade agrícola.

A CTC varia com o pH do solo em decorrência da existência de cargas negativas dependentes do pH. A CTC determinada ao pH do solo é denominada CTC *efetiva* ou *real*. A CTC determinada com uma solução tamponada a pH 7,0 (maior que o pH do solo) é denominada CTC *potencial*. Portanto, em solos ácidos (a maioria o é), a CTC efetiva é inferior à CTC potencial.

A determinação da CTC é feita saturando-se o solo com um determinado cátion (ex.:  $\text{NH}_4^+$  usando o  $\text{CH}_2\text{COONH}_4$  a pH 7,0). A seguir, lava-se o excesso desse cátion com um líquido de baixa polaridade (álcool isopropílico ou etílico); desloca-se o cátion adsorvido ( $\text{NH}_4^+$ ) com outro (ex.:  $\text{Na}^+$  usando  $\text{NaCl}$ ) e determina-se o cátion deslocado, obtendo-se, assim, a medida da CTC. A CTC pode ser estimada através do valor T, que representa a soma dos seguintes cátions trocáveis (adsorvidos):  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Al}^{+3}$  e  $\text{H}^+$ . Existem outros cátions trocáveis no solo, tais como:  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Mn}^{+2}$ ,  $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{Zn}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ , etc., mas se considera que o teor destes é pequeno. Para propósitos práticos, o valor T é aceitável, obtendo-se por soma de cátions normalmente determináveis. Do ponto de vista técnico, é discutível qual a determinação mais indicada (valor T ou CTC, conforme explicado anteriormente) em análises de levantamento de solos, sendo que, em trabalhos feitos no Brasil, é normalmente usado o valor T. Cada tipo de argilomineral e a matéria orgânica do solo (húmus) possuem um valor de CTC mais ou menos definido, como pode ser visto na Figura E.12.

Componente	ASE	CTC
	$\text{m}^2 \text{g}^{-1}$	$\text{cmol} \text{kg}^{-1}$
Montmorilonita	600-800	80-150
Vermiculita	500-800	100-150
Ilita	40-150	10-40
Caulinita	7-30	0-1
Óxidos	60-200	2-4
Matéria orgânica	800-900	200-300

**Figura E.12** - Área superficial específica e capacidade de troca de cátions aproximada para alguns colóides do solo.

## ATIVIDADE

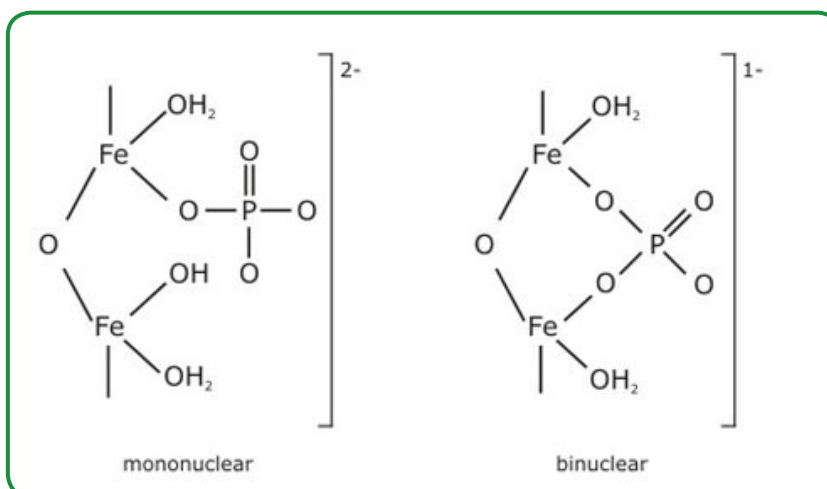
**Atividade E4** - Para realizar a atividade, entre em contato com o professor da disciplina.

### 5.2. Adsorção de ânions

Os ânions podem ser adsorvidos por dois mecanismos:

**a.** adsorção não específica ou adsorção física. Os ânions permanecem hidratados e são atraídos pelas cargas positivas dos colóides do solo. A quantidade de cargas positivas é muito pequena nos solos velhos e estas estão praticamente ausentes nos solos jovens. Os ânions  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{Cl}^-$  possuem muito baixo residual de carga e, por isso, são muito fracamente adsorvidos pelas cargas positivas. Como conseqüência, eles não permanecem no solo. Eles migram para o lençol freático e, em seguida, para os rios e mar.

**b.** adsorção específica por meio de ligações químicas de alta energia. Esse mecanismo é bastante complexo e será tratado com mais detalhes na disciplina de Fertilidade do Solo. Os solos intemperizados (velhos) apresentam predominância de argilominerais do tipo 1:1 (caulinita) e óxidos, os quais apresentam grupos funcionais superficiais (R-OH), que podem ser trocados pelos ânions. Os ânions fosfato ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) e sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) possuem dois átomos de oxigênio muito reativos e, por isso, facilmente deslocam os grupos funcionais superficiais, ligando-se diretamente ao metal dos octaedros (Al e Fe, principalmente) (Figura E.9). A adsorção específica de ânions é muito severa e pode comprometer a disponibilidade às plantas em solos tropicais, especialmente quando o pH for baixo. Isso você verá com muito mais detalhes na disciplina de Fertilidade do Solo.

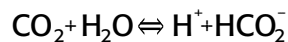


**Figura E.13** - Adsorção específica de fosfato por um óxido de ferro

## 6. Acidez do solo

Em primeiro lugar, nós consideraremos que a acidez do solo é fruto do intemperismo do material de origem e da evolução do solo. Em seguida, apresentaremos como o homem interfere nos processos de acidificação do solo e, logicamente, na correção da acidez do solo.

O início da acidez do solo está na reação do gás carbônico com a água, ainda na atmosfera:



Essa reação mostra que a água da chuva é ácida e aporta  $\text{H}^+$  para o material de origem do solo (rochas). Se você moer uma rocha (basalto ou granito, por exemplo) e medir o pH da suspensão rocha – água, verá que o pH é maior do que 7,0 (básico) (Figura E.14).

Material	pH	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe
		%					
Rocha moída	6,9	0,81	0,17	3,85	0,19	6,0	4,4
Latossolo	4,9	0,07	0,08	0,15	0,04	10,6	11,9

**Figura E.14** - Atributos químicos de uma rocha basáltica e de um solo formado a partir de sua intemperização (Bohen, 2000).

Imagine alguns milhões de anos chovendo sobre uma rocha *“água mole em pedra dura, tanto bate até que fura!”* – eis o ditado dos mais velhos e prudentes.

Logicamente, o intemperismo químico é acelerado pela ação física e biológica. Lentamente, os minerais primários presentes na rocha são destruídos e/ou transformados, liberando para a fase líquida, os elementos químicos que estavam presos no interior dos minerais. A destruição dos minerais é seletiva, destruindo primeiramente os mais frágeis quimicamente. É por isso que, no solo, há muito pouco sódio e cloro, pois o  $\text{NaCl}$  é extremamente solúvel na água ácida da chuva. Esses dois íons já foram transferidos ao mar. À medida que o tempo passa e o solo vai se formando, acumulam-se prótons na solução do solo (vai baixando a acidez ativa ou pH). Também, vão aparecendo no solo os argilominerais jovens (2:1), e a matéria orgânica é introduzida via fotossíntese. Esses dois colóides são muito ricos em cargas negativas.

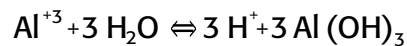
*Você consegue imaginar o que está acontecendo em nosso solo em formação?*

A rocha está sendo fragmentada, os minerais mais frágeis estão se decompondo, íons estão sendo liberados para a solução do solo, acumulam-se prótons e surgem as cargas negativas. Lentamente, o pH



do solo vai baixando. Os ânions e cátions com baixa valência migram no perfil e atingem os mananciais de água. Contrariamente, os cátions com alta valência são preferencialmente adsorvidos pelas cargas negativas.

No momento em que o pH atinge pela primeira vez valores menores do que 5,5, já há H<sup>+</sup> suficiente para 'explodir' os octaedros de alumínio. A partir daí, tudo muda no solo. Até então, o abaixamento do pH era lento e não tinha Al disponível à vida do solo. A partir do aparecimento do primeiro íon de Al<sup>+3</sup>, a acidificação e destruição dos minerais primários do solo se aceleram e já começa a haver problemas de toxidez de Al para a vida do solo não adaptada a esse elemento químico. O Al<sup>+3</sup>, que é consequência da acidez ativa, passa a atuar também como fonte de acidez, devido à seguinte reação química:



A reação acima mostra que 1 cátion de Al<sup>+3</sup> quebra 3 moléculas de água (rouba os OH<sup>-</sup>) e libera para a solução do solo 3 prótons. Assim, os 3 prótons destruíram mais 3 octaedros de Al, liberando 3 cátions Al<sup>+3</sup>, e estes liberarão 9 prótons (3 x 3). Assim, a acidificação entra numa fase exponencial. Depois de alguns milhares ou milhões de anos, o solo se apresentará com pH muito baixo (no RS é aproximadamente 4,3), terá um acúmulo de Al<sup>+3</sup> na CTC do solo muito elevado e grande parte da matéria orgânica do solo estará impregnada de alumínio. Parte do Al<sup>+3</sup> liberado para a solução do solo é adsorvido pelas cargas negativas do solo; outra parte é complexada pela matéria orgânica do solo com alta energia de ligação; uma pequena parte é transferida aos mananciais de água e outra pequena parte é absorvida pelos organismos vivos, embora não seja um elemento essencial.

Desse modo, todo solo será ácido um dia. A acidez do solo é um processo natural e irreversível.

Para que você possa entender melhor a acidez do solo, nós, didaticamente, a dividimos em acidez ativa e acidez potencial.

A acidez ativa é devida aos íons H<sup>+</sup> da solução do solo. Como o próton é fortemente adsorvido aos grupos funcionais, especialmente por meio da adsorção química (ligação química forte), sua concentração na solução é muito baixa. A concentração de H<sup>+</sup> na solução do solo é medida em mol L<sup>-1</sup> e os valores são baixos como 10<sup>-4</sup>, 10<sup>-5</sup>, 10<sup>-6</sup>, etc. Por isso, a acidez ativa é expressa numa escala logarítmica (pH). Então, o pH ou acidez ativa representa o logaritmo negativo ou o logaritmo inverso da atividade dos íons H<sup>+</sup> na solução do solo. A atividade representa a concentração efetiva e, para concentrações muito baixas de eletrólitos,

tos, pode ser considerada igual à concentração. Considerando-se que a atividade dos íons  $H^+$  seja igual à concentração, podemos mostrar a equivalência entre concentração e pH para os valores que mais frequentemente ocorrem no solo (Figura E.15).

$$pH = -\log (H^+) = \log \frac{1}{(H^+)}$$

Concentrações de $H^+$ , mol $L^{-1}$ ou g $L^{-1}$	pH
0,0001 ou $10^{-4}$	4,0
0,00001 ou $10^{-5}$	5,0
0,000001 ou $10^{-6}$	6,0
0,0000001 ou $10^{-7}$	7,0
0,00000001 ou $10^{-8}$	8,0

**Figura E.15** - Relação entre a concentração de prótons e a escala de pH

Pode-se observar que, para cada unidade de diferença de pH, a concentração dos íons  $H^+$  difere 10 vezes, daí porque uma pequena diferença de pH, especialmente na faixa de solos ácidos, pode ser bastante significativa. A escala de pH varia de zero a 14, o pH 7 é considerado neutro, os valores de  $pH < 7$  são considerados ácidos e os valores de  $pH > 7$  são alcalinos. Nos solos, a amplitude de pH varia de 3 a 9, embora os valores mais comuns ocorram na faixa intermediária.

A determinação do pH do solo é feita, comumente, em água, usando uma relação solo:água de 1:1 ou 1:2,5. Mede-se o pH na suspensão, através da imersão de um eletrodo de vidro ligado a um potenciômetro (esse conjunto constitui o pH-metro). O pH também pode ser medido em soluções salinas ( $KCl$  e  $CaCl_2$ ).

A acidez potencial é aquela que está adsorvida na fase sólida, que não causa danos diretos aos seres vivos. É a reserva de acidez. Sempre que há consumo de prótons na solução do solo, ela os repõe rapidamente e, por isso, é chamada de potencial.

Quais são as fontes de acidez potencial? Você lembra dos grupos funcionais e da criação de cargas elétricas?

Os grupos funcionais superficiais dos argilominerais, dos óxidos e, principalmente, da matéria orgânica são a primeira fonte de acidez

potencial. Há um grande reservatório de hidrogênio ( $H^0$ ), que está ligado quimicamente. Os grupos funcionais podem reter o elétron do  $H^0$  e liberar apenas o próton ( $H^+$ ) para a solução. Por isso, os grupos funcionais são considerados fontes de acidez potencial (veja novamente as Figura E.5 e E.7). Você constatará que o húmus e os argilominerais liberam  $H^+$  e se tornam negativos. Esse próton, indo para a solução do solo, fará parte da acidez ativa.

A segunda fonte de acidez potencial é o  $Al^{+3}$ , adsorvido pelas cargas negativas do solo ( $Al^{+3}$  trocável presente na CTC do solo). Como visto anteriormente, o  $Al^{+3}$  trocável pode ir para a solução do solo. Na solução do solo, ele reage imediatamente com a água e libera prótons, roubando da água o grupamento  $OH^-$  para se precipitar. Assim, ele é considerado parte da acidez potencial. Em alguns textos, o  $Al^{+3}$  é chamado de acidez trocável e o  $H^0$  dos grupos funcionais, de acidez não trocável. Portanto, a acidez potencial é o somatório do  $H^0+Al^{+3}$ .

Você verá na disciplina de Fertilidade do Solo que a acidez potencial será usada para a quantificação da dose de **calcário** a ser adicionada ao solo para aumentar a produtividade das culturas.

O  $Al^{+3}$  ou acidez trocável é extraído do solo por uma solução de sal neutro (KCl) e titulado com solução de NaOH. A determinação do  $H^0$  é mais difícil, necessitando de uma solução tampão com pH pré-determinado. O pesquisador deverá pré-estabelecer um valor de pH, pois, mudando os valores de pH da solução tampão, mudarão os valores da acidez não trocável. Na prática, a acidez potencial é determinada integralmente (acidez de troca + acidez não trocável). A acidez potencial real (aquela real do solo) somente pode ser determinada por meio de incubação de amostras de solo com um corretivo de acidez (calcário ou carbonato de cálcio puro, por exemplo). Esse método é muito demorado e caro e é usado para calibrar os métodos laboratoriais de estimativa da acidez potencial. O método mais corriqueiramente usado no laboratório para estimar a acidez potencial é o extrator acetato de cálcio a pH 7,0. A acidez potencial pode ser estimada, também, pelo método SMP. Trata-se de uma solução tamponada a pH 7,5, que funciona muito bem para amostras de solo do horizonte A (que contenha matéria orgânica). Por isso, o método SMP é o método oficial adotado nos estados do RS e SC para a determinação da acidez potencial e, conseqüentemente, da necessidade de calcário.

Relembrando, ao se neutralizar os  $H^+$  (acidez ativa) da solução do solo,  $H^+$  oriundos dos grupos funcionais ou da reação do  $Al^{+3}$  trocável (acidez potencial =  $H^0+Al^{+3}$ ) passam para a solução, restaurando a acidez ativa. Essa tendência de resistir à mudança do seu pH constitui o Poder Tampão do Solo. O poder tampão será tanto maior quanto mais elevado for o teor de matéria orgânica, argilominerais, óxidos (mui-

#### + SAIBA MAIS

Os **calcários** (do latim "calx -cis", "cal") são rochas sedimentares que contêm minerais com quantidades acima de 30% de carbonato de cálcio (aragonita ou calcita). Quando o mineral predominante é a dolomita ( $CaMg\{CO_3\}_2$  ou  $CaCO_3 \cdot MgCO_3$ ), a rocha calcária é denominada calcário dolomítico. Os calcários, na maioria das vezes, são formados pelo acúmulo de organismos inferiores ou precipitação de carbonato de cálcio na forma de bicarbonatos, principalmente em meio marinho. Também podem ser encontrados em rios, lagos e no subsolo (cavernas). No caso do calcário quimiogênico, a formação é em meio marinho: a calcite ( $CaCO_3$ ) é um mineral que se pode formar a partir de sedimentos químicos, nomeadamente íons de Cálcio e Bicarbonato  $\rightarrow CaCO_3$  (calcite) +  $H_2O$  (Água) +  $CO_2$  (dióxido de carbono). Isso acontece quando os meios marinhos sofrem perda de dióxido de carbono (devido à forte ondulação, ao aumento da temperatura ou à diminuição da pressão). Desse modo, para que os níveis de dióxido de carbono que se perdeu sejam repostos, a equação química começa a evoluir no sentido de formar  $CO_2$ , o que leva também à formação de Calcite e, assim, à precipitação desta que, mais tarde, depois de uma deposição e de uma diagênese dá origem ao calcário. (<http://pt.wikipedia.org/wiki/Calc%C3%A1rio>)

tos grupos funcionais) e de Al trocável. Solos arenosos e/ou pobres em matéria orgânica têm, portanto, baixo poder tampão. Dessa forma, verifica-se que, para diminuir a acidez de um solo, não basta eliminar os íons  $H^+$  da solução do solo; é necessário adicionar uma quantidade de corretivos suficiente para consumir a acidez potencial e alcançar a elevação do pH a um nível desejado. Portanto, o valor pH (acidez ativa) é apenas uma estimativa da acidez do solo, sendo necessário também conhecer a acidez potencial para a adoção de medidas mais adequadas à sua correção.

A acidez do solo afeta significativamente as características químicas, físicas e biológicas do solo e a nutrição das plantas. A concentração de íons de  $H^+$  presente na solução dos solos tropicais naturais (sem interferência humana) é alta, cujos valores de pH situam-se na faixa de pH 4,0 a 5,0 (Tabela E.16). A presença de  $H^+$  não constitui transtorno para as plantas. Entretanto, em valores de pH inferior a 5,5, aparecerá o Al trocável, o qual causará sérios danos nas plantas cultivadas não adaptadas a solos ácidos (soja, milho, cevada, fumo, citrus, etc.).

Tipo de solo	Camada	S	Al+H	T	V	pH
	cm		cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>		%	
Vacaria	0-11	2,8	14,2	17,0	16	4,7
Erechim	0-15	0,6	14,0	14,6	4	4,5
Bom Jesus	0-17	3,0	17,0	20,0	15	4,6
Passo Fundo	0-13	1,8	4,6	5,6	24	5,2
Cruz Alta	0-30	1,7	8,8	10,5	16	4,8
São Pedro	0-25	1,8	3,6	5,4	33	5,0
Tupanciretã	0-25	1,0	2,7	3,7	27	5,0

**Tabela E.16** - Dados de análises de alguns solos do Rio grande do Sul, compilados do levantamento de Reconhecimento de Solos do Estado (BRASIL, 1973).

### ATIVIDADE

**Atividade E5** - Para realizar a atividade, entre em contato com o professor da disciplina.

Nas laudas de resultados de análises de solo para fins de recomendação de adubação e calagem e para fins de classificação do solo, aparecem alguns parâmetros calculados a partir das análises químicas. São elas: CTC efetiva, CTC pH 7,0, saturação de alumínio, soma de bases e saturação por bases.

A soma de bases (S) é calculada pela expressão abaixo, cujos teores de Ca e Mg são expressos em  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  e os de K e Na em  $\text{mg kg}^{-1}$ :

$$S = \text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + \text{Al}^{+3} + \left( \frac{\text{K}^+}{390} \right) + \left( \frac{\text{Na}^+}{230} \right)$$

A CTC efetiva é somatório de S com o  $\text{Al}^{+3}$  trocável e expressa em  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ :

$$\text{CTC}_{\text{efetiva}} = S + \text{Al}^{+3}$$

A CTC a pH 7,0 é o somatório de S com a acidez potencial ( $\text{H}^0 + \text{Al}^{+3}$ ) e expresso em  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ :

$$\text{CTC}_{\text{pH } 7,0} = S + (\text{H}^0 + \text{Al}^{+3})$$

A saturação por Al é a relação entre o teor absoluto de  $\text{Al}^{+3}$  trocável e a CTC efetiva e é expressa em porcentagem:

$$\text{Al}\% = \left( \frac{\text{Al}^{+3}}{\text{CTC}_{\text{efetiva}}} \right) \times 100$$

A saturação por bases (V) é a relação entre a soma de bases (S) e a CTC a pH 7,0 e é expressa em porcentagem:

$$\text{V}\% = \left( \frac{S}{\text{CTC}_{\text{pH } 7,0}} \right) \times 100$$

Classe	pH em água	S	CTC 7,0	Al	V
		cmolc kg-1		%	%
Muito baixo	≤ 5,0	≤ 2,0	≤ 5,0	≤ 1	≤ 45
Baixo	5,1 - 5,4	2 - 4	5,1 - 15,0	1 - 10	45 - 64
Médio	5,5 - 6,0	4 - 6	> 15,0	10 - 20	65 - 80
Alto	> 6,0	> 6		> 20	< 80

**Tabela E.17** - Interpretação dos valores de pH, soma por bases (S), CTC a pH 7,0, saturação por Al e saturação por bases (V) e em solos

Um solo é considerado 'distrófico', quando a saturação de bases for menor que 50%, e 'eutrófico', quando for maior ou igual a 50%.

Também é possível estimar o tipo de argilomineral presente no solo a partir dos dados de análise da CTC a pH 7,0, do teor de argila do solo e da porcentagem de matéria orgânica. Para tal, somente é necessário saber resolver regras de três simples, como visto abaixo.

Considerando um solo que apresente CTC a pH 7,0 = 12,07  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ , matéria orgânica = 2,3 % e argila = 23 %. Assumindo-se que a CTC média da matéria orgânica é 250  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ , calcula-se quanto os 2,3 g contribuem para a CTC do solo:

$$1000 \text{ g de matéria orgânica} \rightarrow 250 \text{ cmol}_c$$

$$2,3 \text{ g de matéria orgânica} \rightarrow x \text{ cmol}_c$$

$$x = 5,75 \text{ cmol}_c$$

Subtraindo-se esse valor da CTC total do solo, tem-se a CTC devida aos argilominerais ( $12,07 - 5,75 = 6,32 \text{ cmol}_c$ ). Assim:

$$23 \text{ g de argilomineral} \rightarrow 6,32 \text{ cmol}_c \text{ de CTC}$$

$$100 \text{ g de argilomineral} \rightarrow x$$

$$x = 23,13 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$$

Essa quantidade de carga negativa a pH 7,0 é característica da illita (argilomineral 2:1 não expansivo).

## 7. Floculação e dispersão de colóides

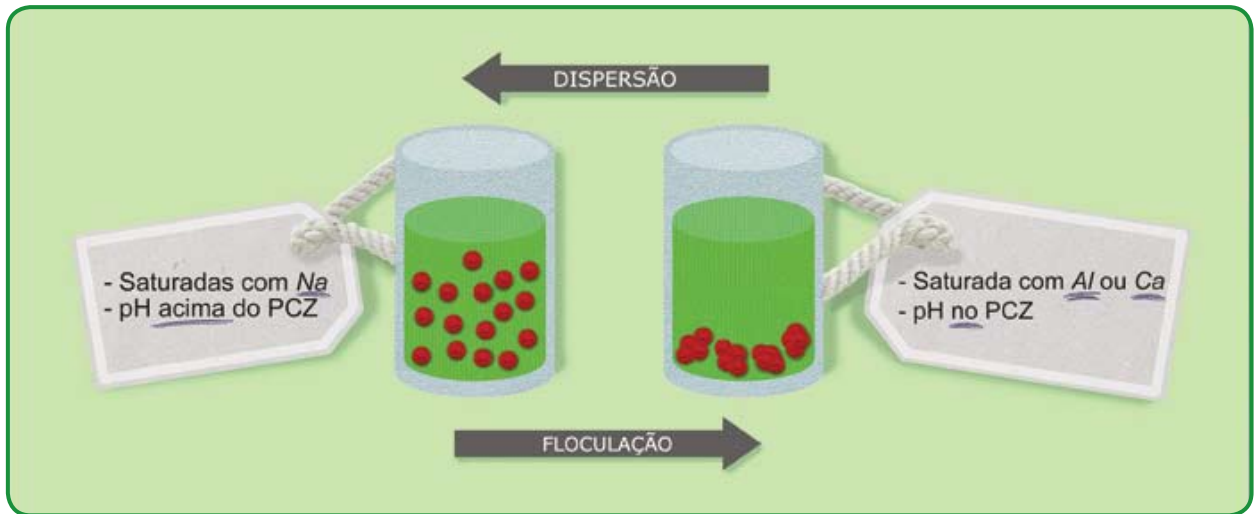
Entre as partículas de uma dispersão coloidal existem dois tipos fundamentais de forças:

**a.** as forças de atração que ocorrem quando as partículas estão muito próximas. A atração é resultante da orientação de dipolos ou da coordenação do movimento de elétrons entre as partículas;

**b.** as forças de repulsão, que são consequência da repulsão das cargas elétricas de mesmo sinal.

Quando, em uma dispersão coloidal em meio líquido predominam as forças de atração, ocorre a floculação ou coagulação, e as partículas agrupam-se formando pequenos flocos que decantam até o fundo do recipiente. Quando predominam as forças de repulsão, a dispersão tende a se estabilizar, não ocorrendo a aproximação entre as partículas. Temos então, a dispersão ou floculação (Figura E.18).





**Figura E.18** - Representação esquemática do processo de dispersão e floculação de um sistema coloidal

A floculação dos colóides de solo é um fenômeno muito importante, tanto sob o aspecto pedogenético, de pedoturbação, de formação da estrutura. A própria diferenciação dos horizontes tem relação com a floculação e defloculação dos colóides do solo.

Dois aspectos devem ser considerados para se entender a floculação:

- a. neutralização das cargas negativas (em geral são as que predominam no solo) por um cátion, permitindo a aproximação das partículas e a conseqüente floculação - nesse caso, o  $H^+$  e os cátions polivalentes, como o  $Al^{+3}$ ,  $Ca^{+2}$  e  $Mg^{+2}$ , são mais efetivos;
- b. em solos tropicais com predominância de óxidos de Fe e Al e de caulinita no sistema coloidal, o pH é um fator importante a ser considerado, visto que as cargas negativas e positivas são dependentes do pH. Dessa forma, o aumento do pH deverá aumentar as cargas negativas, provocando uma maior repulsão entre as partículas e dificultando a floculação ou provocando a defloculação, quando, então, a argila poderá se mobilizar, migrando para o interior do perfil ou sendo arrastada pelo escoamento superficial da água (erosão).

## 8. Atividade Final da Unidade E

### ATIVIDADE

**Atividade E6 e E7** - Para realizar a atividade, entre em contato com o professor da disciplina.

## 9. Bibliografia

### 9.1. Bibliografia básica da Unidade E

KAMPF, N. & CURI, N. Argilominerais em solos brasileiros. In: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: SBCS, volume III, 2000. p.1-54.

MEURER, J.E. **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre: Gênese, 2000. 174p.

OLIVEIRA, J.B., JACOMINE, P.K.T. & CAMARGO, M.N. **Classes gerais de solos do Brasil**. Jaboticabal: FUNEP, 1992. 201p.

SANTOS, G.A. & CAMARGO, F.A.O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. 508p.

### 9.2. Bibliografia complementar da Unidade E

BRADY, N.C. & WEIL, R.R. **The nature and properties of soils**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. 960p.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. **Levantamento de Reconhecimento de Solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Recife: SBCS, 1973. 431 p.

FASSBENDER, H. **Química de Suelos, con énfasis en suelos de América Latina**. Turrialba: IICA, 1975. 374 p.

## UNIDADE F

### Propriedades físicas do solo

#### Introdução

Do ponto de vista físico, o solo é um meio poroso, não rígido, trifásico, formado de partículas que possuem complexidade de forma, de tamanho e de estrutura mineralógica, com algumas partículas finamente divididas de maneira a apresentar em uma grande área superficial. Um solo fisicamente ideal é aquele que apresenta boa aeração e retenção de água, bom armazenamento de calor e pouca resistência mecânica ao crescimento radicular. O conhecimento das propriedades físicas do solo pode auxiliar na adoção do melhor manejo, bem como contribuir na compreensão do comportamento do solo e das plantas, pois distintos solo e espécies vegetais possuem comportamentos e respostas diferenciadas em relação ao manejo do solo. Isso pode parecer complicado, mas você verá que esse tema se relaciona bastante com os tópicos vistos anteriormente.

#### Objetivos

Os objetivos desta unidade são:

- abordar as principais propriedades físicas do solo;
- apresentar algumas metodologias para a determinação de propriedades físicas do solo;
- diferenciar propriedades que afetam direta e indiretamente a produção de plantas;
- integrar propriedades do solo para compor um indicador de qualidade física do solo;
- discutir relações do manejo com mudanças em propriedades físicas do solo;
- apresentar e estimular aplicações dos conceitos apresentados.

## 1. Textura do solo

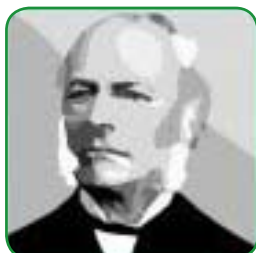
### 1.1. Definições e determinação

A textura, granulometria ou distribuição de tamanho de partículas é a proporção relativa das classes de tamanho de partículas de um solo, sendo uma das propriedades mais estáveis do solo. É afetada, primariamente, pelo tipo de material de origem e grau de intemperismo. O manejo do solo não afeta a textura, exceto se há remoção seletiva de argilas com a erosão do solo.

A determinação da textura pode ser feita no campo, como visto na Unidade B, ou em laboratório via análise granulométrica. O objetivo é separar as frações constituintes do solo (areia, silte e argila), de acordo com seu diâmetro. A metodologia consiste em dispersão química e mecânica dos constituintes do solo e separação por peneiramento e sedimentação (*lei de Stokes*).



#### PERSONALIDADE



Sir George Gabriel Stokes (1819-1903) foi um matemático e físico irlandês, que fez importantes contribuições na dinâmica de fluidos, ótica e matemática-física. Nas pesquisas sobre movimento e viscosidade de fluidos, desenvolveu a equação para o cálculo da velocidade terminal de queda de uma esfera (como as partículas de solo) que sedimenta em meio viscoso, o que passou a ser chamado de Lei de Stokes. Essa lei diz que a velocidade de sedimentação é diretamente proporcional à densidade da partícula e inversamente proporcional à viscosidade do fluido e diâmetro da partícula.

A textura relaciona-se com a **mineralogia do solo**, capacidade de troca de cátions, área superficial específica e porosidade e densidade do solo. Condiciona todos os fatores de crescimento em menor ou maior grau e influi em inúmeras propriedades físicas do solo, como retenção, movimento e disponibilidade de água; arejamento do solo; disponibilidade de nutrientes às plantas; resistência à penetração de raízes; estabilidade de agregados; compactabilidade do solo e erodibilidade do solo.

A estabilidade, a compactabilidade e a erodibilidade estão relacionadas com a suscetibilidade à degradação do solo quando cultivado.

Uma comparação entre solos argilosos e arenosos é feita na Figura F.1. Você deve tomar cuidado, pois a mineralogia do solo pode alterar esse comportamento.



#### SAIBA MAIS

A fração areia do solo é composta basicamente por minerais primários, incluindo quartzo e outros silicatos, enquanto a fração argila é constituída por minerais secundários ou pedogênicos, incluindo os argilominerais caulinita, ilita, vermiculita, esmectita e óxidos.

<b>Textura fina (solos argilosos)</b>	<b>Textura grosseira (solos arenosos)</b>
Capacidade retenção de água elevada	Capacidade retenção de água baixa
Circulação de água difícil	Circulação de água fácil
Coesão elevada	Coesão baixa
Consistência plástica e pegajosa (quando molhado) e dura (quando seco)	Consistência friável (quando seco ou molhado)
Densidade do solo menor	Densidade do solo maior
Porosidade total maior	Porosidade total menor
Microporosidade maior	Macroporosidade maior
Aeração deficiente	Boa aeração
Superfície específica elevada	Superfície específica baixa
Solos bem estruturados	Solos mal estruturados
Difícil preparo mecânico	Fácil preparo mecânico
CTC elevada	CTC baixa
Mais ricos em nutrientes	Mais pobres em nutrientes

**Figura F.1** - Algumas propriedades dos solos conforme a granulometria.

## **1.2. Relação da textura com o tipo de manejo do solo**

Para solos medianamente ou bem intemperizados, há melhoria da qualidade física de solos com o aumento de argila de um solo. Por isso, muitas vezes, os agricultores preferem solos argilosos ou barrentos. Isso porque há restrições ao uso agrícola intenso de solos arenosos, principalmente devido à elevada suscetibilidade à erosão, baixa capacidade de retenção de água e limitada reserva de nutrientes.

Contudo, com o conhecimento desenvolvido e as possibilidades de manejo do solo, a limitação relacionada à erosão dos solos arenosos é grandemente aliviada com o uso de plantio direto e plantas de cobertura, dentro de um esquema eficiente de rotação de culturas.

A baixa retenção de água por unidade de volume dos solos arenosos pode ser compensada, em parte, pela maior facilidade de crescimento radicular, associada ao maior arejamento e macroporosidade

(espaços disponíveis ao crescimento radicular sem restrição física de resistência), conferindo maior lâmina de água disponível do que a convencionalmente atribuída.

A baixa reserva mineral está associada à baixa capacidade de troca de cátions (CTC) dos solos arenosos, que, por sua vez, predispõe esses solos ao processo de lixiviação de cátions. Para solos de textura arenosa, a maior parte da CTC está associada à matéria orgânica, que normalmente também é baixa. Estudos em solos arenosos e de textura média demonstram que o teor de matéria orgânica pode ser recuperado, e até mesmo aumentado, em relação ao campo nativo (condição existente antes da agricultura), dependendo da taxa de adição de resíduos, redução de mobilização e tempo de utilização dos sistemas de manejo do solo e de plantas.

Portanto, você pode verificar que, mesmo solos naturalmente menos aptos à agricultura, podem ser produtivos desde que usados e manejados racionalmente.

### ATIVIDADE

**Atividade F1** - Para realizar a atividade, entre em contato com o professor da disciplina.

## 2. Consistência do solo

A consistência do solo refere-se à resposta do solo às forças externas que tentam deformá-lo ou rompê-lo e deve-se à manifestação das forças de **coesão e adesão**, sob diferentes teores de água (ou umidade) do solo.

Os estados físicos, chamados de 'estados de consistência' e suas fronteiras, são apresentados na Figura F.2. A conceituação do limite de liquidez (LL) e do limite de plasticidade (LP) é atribuída ao cientista sueco **Atterberg** (1911), e o do limite de consolidação (LC), a Haines, enquanto Casagrande desenvolveu um método prático, ainda hoje utilizado, para determinar o LL.

### PERSONALIDADE

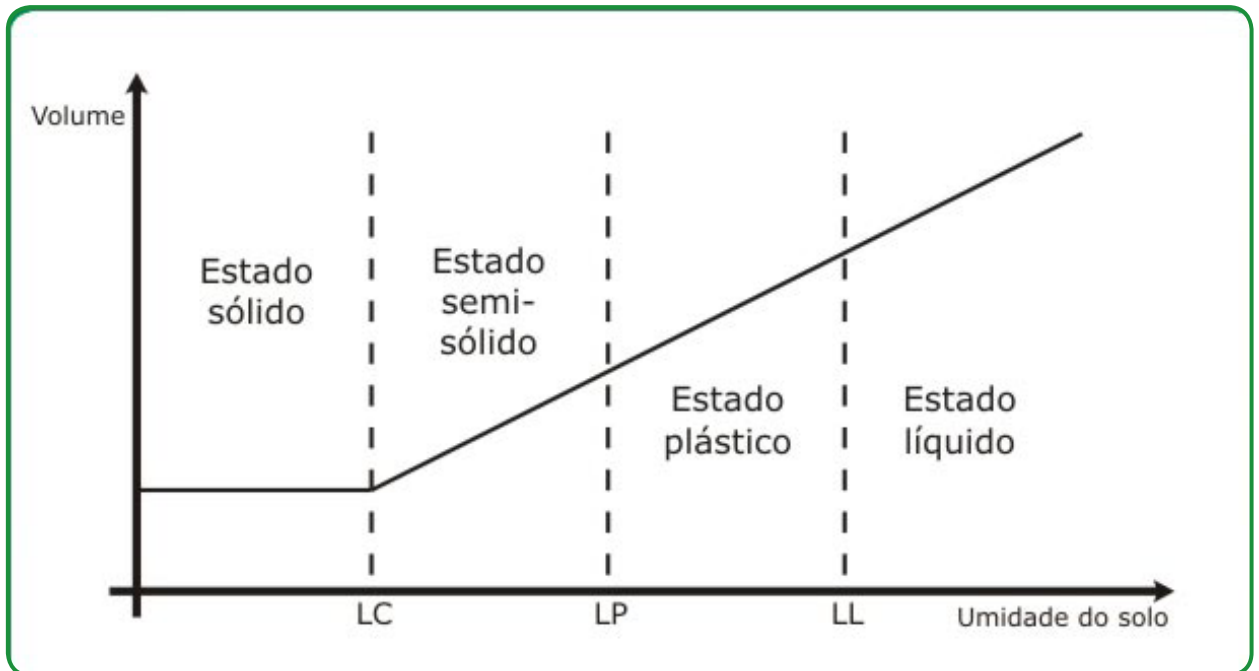


Albert Atterberg (1846-1916) foi um químico sueco que propôs os limites de Atterberg, quando buscava caracterizar argilas para uso na indústria de cerâmica. Atualmente, essa metodologia é usada em várias ciências, desde a Engenharia até a Agronomia.

### GLOSSÁRIO

**Coesão é a atração** entre partículas de mesma natureza (sólido-sólido) devido à atração eletrostática entre superfícies, à atração molecular (forças de van der Waals) e à presença de materiais coloidais. Ela é função da área superficial específica, da umidade e da distância entre partículas do solo e de sua orientação. Adesão é a atração entre partículas de natureza distinta (líquido-sólido), devido à tensão superficial d'água (a qual será estudada mais adiante neste texto).





**Figura F.2** – Estados de consistência e limite de plasticidade em relação à variação de umidade. LC – limite de contração, LP – limite de plasticidade, LL – limite de liquidez, IP – índice de plasticidade ( $IP=LL-LP$ ).

Solos argilosos, coesivos, podem se apresentar em estado sólido, semi-sólido, líquido ou plástico, dependendo de sua umidade. Com a secagem de um solo saturado, a variação da consistência com a umidade de um solo coesivo segue os seguintes estados e limites:

- a. no 'estado líquido', o solo praticamente não apresenta resistência ao cisalhamento. À medida que perde água, o solo (coesivo) endurece (ou fica mais viscoso);
- b. a partir de certo teor de umidade LL (limite de liquidez), o solo perde sua capacidade de fluir, porém, pode ser moldado facilmente e conservar sua forma, caracterizando o 'estado plástico';
- c. com a continuação de perda de umidade, a capacidade de ser moldado diminui, até que a partir da umidade no LP (limite de plasticidade) a amostra fratura ao tentarmos moldá-la. Este é o chamado 'estado semi-sólido', no qual o solo tem aparência sólida, mas sofre reduções de volume enquanto continuar a secar. A plasticidade se manifesta quando a água lubrifica as partículas, possibilitando o deslizamento entre elas, e esse intervalo é denominado de índice de plasticidade IP;
- d. continuando a secagem, ocorre a passagem gradual para o 'estado

sólido, em que praticamente não mais ocorre variação de volume devida à redução de umidade. O limite entre esses dois últimos estados é o LC (limite de contração).

A consistência depende de:

- a. conteúdo de argila: a plasticidade é uma função das frações mais finas do solo; assim, o aumento no teor de argila eleva o limite plástico e o índice de plasticidade;
- b. natureza dos minerais: o tamanho, a estrutura dos minerais, o tipo de mineral e a sua proporção no solo afetam diretamente a plasticidade. Solos com minerais com argilas laminares apresentam plasticidade, enquanto o quartzo e o feldspato não são plásticos. A diferença se atribui à maior superfície e ao maior contato entre partículas de solo. A plasticidade diminui na seguinte ordem: montmorillonita (2:1 expansivo) > ílita (2:1 não expansivo) > caulinita (1:1 não expansivo).
- c. natureza das trocas catiônicas: as trocas catiônicas têm influências consideradas no grau de plasticidade do solo. Assim, por exemplo, em solos saturados com Na, o limite plástico é mais baixo e o índice de plasticidade mais alto. Os solos saturados de Mg têm a tendência de ter índices de plasticidade ligeiramente mais altos que os saturados com Ca;
- d. teor de matéria orgânica: a matéria orgânica aumenta os limites de plasticidade e de liquidez, mas praticamente mantém inalterado o índice de plasticidade.

Veja que a consistência está diretamente ligada à **área superficial específica**.

A partir de um torrão de solo ligeiramente úmido (mas não molhado), podemos avaliar os esforços, deformações e resistência do solo. Tenta-se romper o torrão úmido com os dedos (ou se necessário com a mão), para verificar a resistência à pressão. Esse estado de consistência é conhecido como friabilidade e pode variar de solto a extremamente firme (Lemos e Santos, 1996).

### ATIVIDADE

**Atividade F2** - Para realizar a atividade, entre em contato com o professor da disciplina.

### ALERTA

A superfície específica de um material do solo é uma propriedade fundamental e intrínseca, que se correlaciona com fenômenos importantes, como a capacidade de troca de cátions, a retenção e liberação de variáveis químicas (incluindo nutrientes e certos poluentes potenciais do ambiente), a retenção de água e propriedades mecânicas (plasticidade, coesão e resistência).

Os produtores rurais sabem disso e, normalmente, preferem preparar o solo nesse estado de consistência, pois o solo oferece menor resistência, tendo em vista que as forças de coesão e adesão são menores. Precisamos associar o conhecimento científico com o conhecimento popular; os dois são complementares.

Você pode ver como o solo se comporta em seus distintos estados de consistência na Figura F.3., bem como ver que cuidados devem ser tomados quando do seu preparo e manejo.

Umidade do solo	Seco	Úmido	Molhado		Saturado
			Pouco molhado	Muito molhado	
Força	Coesão é maximizada e adesão é mínima	As forças de coesão e adesão atuam conjuntamente, mas não são maximizadas	A coesão desaparece e a adesão atinge o máximo. Quando o solo está muito molhado, os filmes de água que recobrem as partículas se tornam mais espessos		A adesão é minimizada
Forma de consistência	Duro, áspero	Friável macio	Plástico, Viscoso (colante)		Fluído
Grau relativo de consistência	Muito alto	Baixo	Alto		Muito baixo
Agentes principais responsáveis pela consistência	Atração molecular (coesão)		Tensão da superfície (adesão)		
Resistência ao rolamento	Alto	Imparcialmente alto	Baixo	Muito baixo	Praticamente nenhum
Condições para o preparo do solo	Preparo muito difícil	Preparo fácil	Preparo difícil, implementos tendendo a afundar e deslizar	Preparo menos difícil, mas tração baixa, implementos frequentemente atolam	Impossível (exceto se com lâmina de água, tipo em lavouras de arroz)
Resultado na lavoura	Solo forma torrões e poeira	Solo esmigalhado/despedaçado, efeitos ótimos na estrutura	Poças de solos	Solos escoam como se fossem líquidos	
Gráfico representativo da relação do grau de consistência					

**Figura F.3** - Efeitos da umidade do solo na consistência dos solos de médio e alto teor de argila (modificado de Kohnke, 1968).

### 3. Estrutura do solo

A estrutura refere-se ao arranjo de agregados e poros do solo. Assim, neste texto, trataremos primeiramente das relações massa/volume associadas à estrutura do solo e, posteriormente, ao arranjo ou arquitetura do solo, com ênfase na agregação do solo.

Na avaliação da estrutura, são utilizados dois pontos de vista: o pedológico, abordado na Unidade B, e o aplicado, relacionado ao uso e manejo do solo.

A estrutura do solo relaciona-se com a densidade e porosidade do solo, a aeração, a resistência mecânica à penetração, a infiltração de

água, o selamento superficial do solo, dentre outros.

Solos bem estruturados suportam melhor a precipitação e a ação de máquinas e implementos agrícolas e também permitem uma maior produção das culturas.

### 3.1. Relações massa-volume associadas à estrutura do solo

O volume total de um solo (ou de uma amostra de solo) pode ser dividido em volume de poros vazios ou ( $V_p$ ) e de sólidos ou partículas ( $V_p$ ), e a somatória é o volume total. Os poros podem estar ocupados por ar ( $V_a$ ) ou água ( $V_w$ ).

Similaneamente, essas frações têm massa! Assim temos massa de partículas ou sólidos ( $M_s$ ), de água ( $M_w$ ) e de ar ( $M_a$ ), a qual é desprezível, e a somatória é a massa total ( $M_t$ ).

Você pode verificar esses volumes e massas na Figura F.4. A partir delas, podemos estabelecer uma série de relações ou equações, para calcular importantes propriedades do solo.

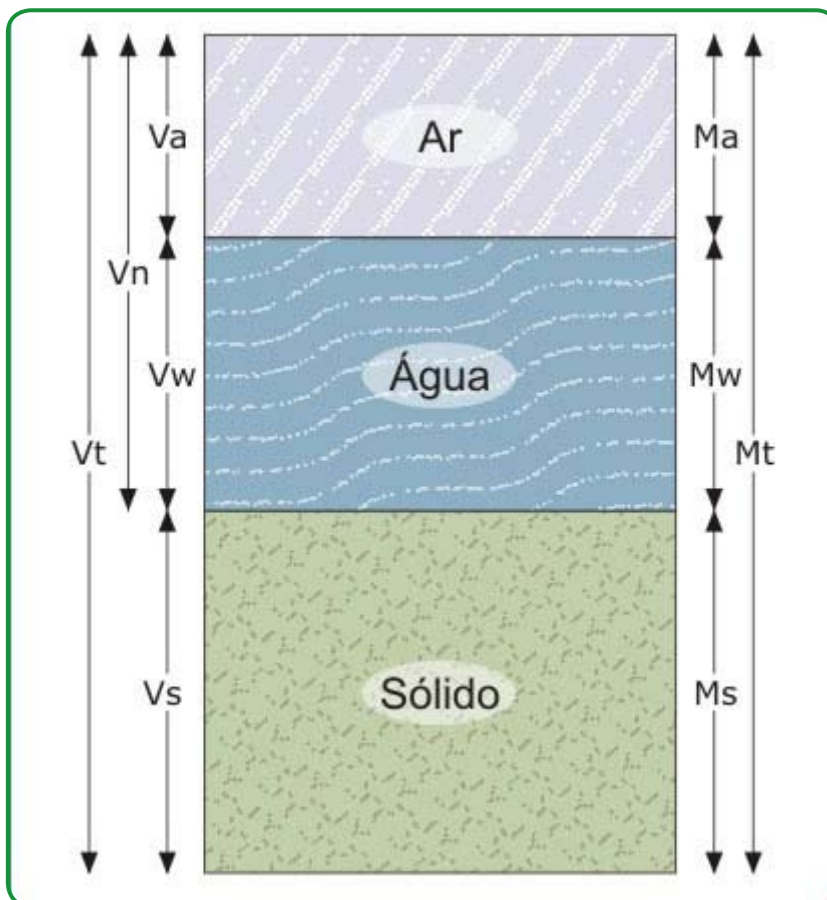


Figura F.4 - Relação massa/volume das três fases do solo.

**a.** densidade do solo:  $D_s = M_s/V_t$ , com unidade de  $g/cm^3$  ou  $Mg/m^3$  (i.e., toneladas por 1000 litros de solo). A  $D_s$  varia com a textura e estrutura, sendo bastante afetada pelo manejo e pela compactação do solo. Também possibilita a transformação do conteúdo gravimétrico da água no solo em altura de lâmina de irrigação;

**b.** densidade de partículas:  $D_p = M_p/V_p$ , com unidades similares à da 'Ds'. A densidade de partículas não é afetada pelo manejo, mas depende da constituição mineralógica e da matéria orgânica do solo. O valor médio é  $2,65 Mg/cm^3$ , mas solos com óxidos de ferro têm valores maiores e os com bastante matéria orgânica, valores menores. A  $D_p$  é normalmente usada para calcular a porosidade total do solo;

**c.** porosidade total do solo:  $P_t = V_p/V_t$  ou, alternativamente,  $P_t = [1 - (D_s/D_p)]$ . A unidade é  $m^3/m^3$  ou, quando multiplicada por 100, %. Como o volume de poros é afetado pela compactação ou preparo do solo, a  $P_t$  é também variável. O total de poros pode estar preenchido por água ou por ar, e isso veremos abaixo. Solos argilosos são, normalmente, menos densos e, portanto, mais porosos que solos arenosos. Contudo, via de regra, os solos arenosos têm maior quantidade de poros grandes (macroporos);

**d.** umidade gravimétrica:  $U_g = M_w/M_s$ , com unidade  $kg/kg$  ou, quando multiplicada por 100, %. Alguns solos, como os orgânicos, podem ter  $U_g$  maior que 100 %;

**e.** umidade volumétrica:  $U_v = V_w/V_t$ , com unidade  $m^3/m^3$  ou, quando multiplicada por 100, %. A  $U_v$  nunca pode ser superior à  $P_t$ , pois ambas se equivalem quando o solo está saturado (i.e., todos os poros preenchidos com água). Para facilitar o cálculo da  $U_v$ , podemos usar a fórmula  $U_v = U_g * D_s$ ;

**f.** lâmina de água armazenada:  $L = U_v \times \text{profundidade do solo}$ , com unidade m ou cm;

**g.** espaço aéreo:  $E_A = V_a/V_t$  ou, alternativamente,  $E_A = P_t - U_v$ , com unidades similares à da  $P_t$ , onde  $U_v$  é a umidade volumétrica do solo. O espaço aéreo indica quanto da porosidade está ocupado por ar e, portanto, depende da umidade do solo.

E como são obtidos esses valores na prática? Usando um pequeno cilindro, se obtém uma amostra com estrutura preservada, de modo que o solo preencha completamente o volume do anel (Figura F.5). Pesa-se o anel, depois o anel mais a amostra ao ar e, novamente a amostra, depois de completamente seca em estufa a  $105^\circ C$ .





**Figura F.5** - Coleta de uma amostra de solo para as determinações massa-volume. Após extraída do solo (foto à esquerda), o excesso de solo (ao centro) é removido cuidadosamente (à direita) para que o volume do anel ( $V_c$ ) corresponda exatamente ao volume de total amostra de solo ( $V_t$ ).

Veja que temos os seguintes valores: massa do anel ou cilindro ( $M_c$ ), do solo úmido ( $M_u$ ) e seco ( $M_s$ ), bem como do volume do anel ( $V_c$ ), que será igual ao da amostra de solo ( $V_t$ ). Por diferença, calculamos a massa de água ( $M_w = M_u - M_s$ ). E aí é só usar as fórmulas acima, para obtermos os valores de  $D_s$  e  $P_t$ .

### ATIVIDADE

**Atividade F3** - Para realizar a atividade, entre em contato com o professor da disciplina.

## 3.2. Agregação do solo

### 3.2.1. Formação e estabilização de agregados

A formação de agregados do solo pode ser dividida, para fins didáticos, em dois processos:

**a.** aproximação entre as partículas devido à flocculação da argila (vide Unidade E); à desidratação ou secamento do solo, criando fendas e aproximando partículas; às raízes, que causam desidratação e exercem pressão sobre as partículas de solo; e aos organismos vivos, como as minhocas, as quais produzem coprólitos de alta estabilidade.

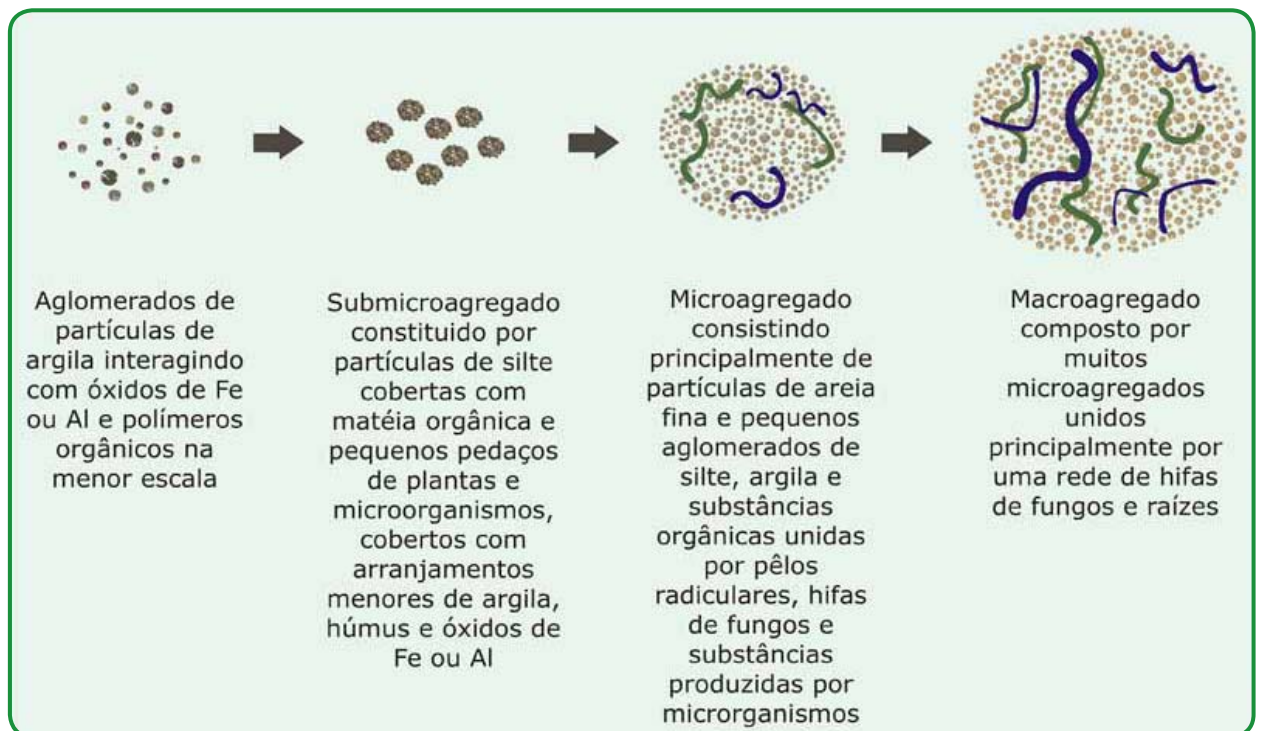
**b.** estabilização dos agregados formados, com ação de agentes cimentantes. A estabilização é dependente da quantidade de argila e de cátions; das forças eletrostáticas e de van der Waals; da matéria orgânica, com ação de polissacarídeos e ácidos orgânicos; dos microrganismos: ação mecânica (hifas de fungos) e produção de compostos orgânicos; e da vegetação, pela ação mecânica das raízes e como fonte de mate-



rial orgânico na superfície.

Veja que, na formação de aglomerados, as argilas, óxidos e cátions são fundamentais. Contudo, para a formação de agregados maiores, a atividade biológica e das raízes são essenciais. Isso pode ser visualizado na Figura F.6. Veja, portanto, quão importante é manter o solo coberto com sistema de culturas diversificado, que estimule a atividade biológica do solo.

Lembre sempre: O solo é um ser vivo!



**Figura F.6** - Importância hierárquica de mecanismos formadores de agregados.

### 3.2.2. Estabilidade de agregados

A estabilidade de agregados refere-se à resistência à desagregação que os agregados apresentam quando submetidos a forças externas (ação de implementos agrícolas e impacto da gota de chuva) ou forças internas (compressão de ar e expansão/contração em agregados, com o umedecimento) que tentam rompê-los.

O objetivo é avaliar a estrutura do solo, pois a estrutura é o resultado da agregação das partículas primárias (areia, silte e argila) e de outros componentes do solo, como matéria orgânica, calcário e sais.

A metodologia consiste em passar os agregados por um conjunto de peneiras com diâmetros decrescentes e quantificar as frações reti-

das, em água ou a seco (no ar). Através dessa determinação, podemos obter a distribuição do tamanho dos agregados e calcular sua média ponderada, chamada de diâmetro médio ponderado (DMP) ou geométrico (DMG) de agregados estáveis.

### **3.2.3. Estrutura e manejo do solo**

O arranjo espacial das partículas e os espaços entre partículas (poros) definem o ambiente ecológico do solo.

Nos sistemas agrícolas, os solos são submetidos a sucessivas pressões pelo tráfego de máquinas na semeadura, tratos culturais e colheita, agindo no sentido de compactar o solo. Por outro lado, o sistema alivia tais efeitos através da redução das pressões efetivas pela palha na superfície, aumento da matéria orgânica no solo e aumento da atividade biológica, que age no sentido de melhorar a estrutura do solo.

A resistência do solo em manter a forma atual ou adquirida define a estabilidade estrutural. O aumento da cobertura do solo, da atividade microbiológica e da matéria orgânica e a menor exposição da matéria orgânica à decomposição pelos microorganismos aumentam a estabilidade estrutural, a qual tem relação direta com a habilidade de um solo em resistir à erosão.

A presença da matéria orgânica no solo, nos vários estágios de decomposição, a atividade e a natureza dos microorganismos, associados à ação de sistema radicular de plantas, são altamente variáveis, considerando o enorme número possível de fontes de matéria orgânica, a variação de microorganismos e de tipos de sistemas radiculares. Tal fato impõe à estrutura do solo grande dinamicidade para os vários ambientes agrícolas e, para um mesmo ambiente, uma grande dinamicidade no tempo.

As taxas de aumento de agregação, no entanto, estão relacionadas à textura do solo, ao manejo e aos sistemas de cultura adotados. A degradação e o processo inverso, que é a recuperação da estabilidade estrutural, são, pelo menos, duas vezes mais rápidas em solos arenosos do que em solos argilosos.

A estabilidade estrutural está inversamente relacionada com a frequência e a intensidade de mobilização do solo.

O sistema de plantio direto (SPD) age no sentido de melhorar as condições da estabilidade estrutural, e seu efeito pode ter taxas baixas ou altas de melhoramento, dependendo do manejo global do solo e dos sistemas de culturas adotados.

Com a compactação dos solos, por outro lado, há um aumento da densidade e da resistência do solo e a redução da porosidade, principalmente da macroporosidade ou porosidade de aeração (poros maio-

res que 50 $\mu$ m). Além disso, ela afeta diversos atributos do solo, como a condutividade hidráulica, permeabilidade, infiltração de água e outras características ligadas à porosidade do solo.

Essas alterações físicas, provocadas pela compactação, afetam o fluxo ou a concentração de água, oxigênio, dióxido de carbono, nutrientes e temperatura, que podem limitar o crescimento e desenvolvimento das plantas e causar problemas ambientais.

O maior estado de compactação de solos sob SPD, indicado pela densidade do solo, ocorre entre 8 e 15 cm de profundidade. Para alguns tipos de solos e de plantas, esse aumento da densidade verificado não é prejudicial ao desenvolvimento destas, devido a uma maior continuidade dos poros, que é uma importante característica que afeta a aeração do solo, a infiltração de água e a penetração de raízes. Mas, em algumas ocasiões, esse fato tem sido um fator limitante à adoção do sistema de plantio direto.

A atividade biológica pode aliviar os efeitos negativos da compactação na superfície do solo, mas não em maiores profundidades. A melhor maneira de aliviar os efeitos da compactação do solo na agricultura é criar uma rede estável de macroporos contínuos, pois estes favorecem o crescimento radicular, a aeração e a permeabilidade da água.

Outra propriedade física do solo, alterada pelo sistema de manejo do solo, é a sua resistência mecânica à penetração. Ela está estreitamente associada à densidade do solo e, para o mesmo teor de água, é tanto maior quanto maior a densidade do solo, mostrando ser um bom indicador da compactação quando corretamente utilizada.

#### ATIVIDADE

**Atividade F4** - Para realizar a atividade, entre em contato com o professor da disciplina.

## 4. Água no solo

### 4.1. Propriedades fundamentais da água

Água e ar ocupam o mesmo espaço e competem entre si. Solo seco tem muito ar e solo saturado tem aeração zero. Nenhum desses dois extremos é desejado.

A água afeta inúmeras propriedades físicas, químicas e biológicas e é fundamental para a vida no solo, em especial à produção vegetal.

Duas propriedades da água são fundamentais para o entendimento do seu comportamento (retenção e movimento) no solo:

a. tensão superficial, devido às forças de coesão. A atração das moléculas de água para dentro do seio do líquido é maior do que para fora (moléculas de água no estado gasoso);

b. capilaridade, devido à tensão superficial e à adesão da água com as paredes de um poro. A equação da capilaridade nos diz que quanto menor o diâmetro do poro, maior será a ascensão capilar e maior será a energia de retenção da água no solo.

#### 4.2. Quantidade e energia de retenção de água no solo

Para as plantas, interessa a quantidade de água e a energia com que está retida. A quantidade pode ser determinada com amostras coletadas (*vide* tópico 5.1) ou diretamente no campo, sem perturbar o solo. Exemplos desses equipamentos são a sonda de nêutrons, que mede a umidade gravimétrica, e o reflectômetro de domínio de tempo (TDR) (Figura F.7), que mede a umidade volumétrica. A medição da umidade do solo com o TDR baseia-se na constante dielétrica do solo.

#### + SAIBA MAIS

Quanto mais úmido o solo, maior a sua **constante dielétrica**. Isso afeta a velocidade de propagação da onda eletromagnética transmitida e propagada no solo através de sensores.



**Figura F.7** - TDR sendo instalado no campo para a medição da umidade volumétrica do solo.

O potencial total da água no solo expressa o grau de energia livre (facilidade que um determinado corpo tem em mudar de estado ou posição) de uma determinada massa, peso ou volume, numa dada si-

tuação e posição no solo.

A energia da água dentro do solo é responsável retenção, movimento e absorção pelas plantas e liberação para a atmosfera.

O potencial total (Pt) é a somatória de seus componentes, i.e.,  $Pt = P_g + P_m + P_p + P_o$ . Esses componentes são descritos abaixo:

**a.** potencial gravitacional ( $P_g$ ): todo corpo (inclusive a água) está sujeito à ação da gravidade. Por isso, a água tende a se mover no sentido descendente devido ao efeito gravitacional;

**b.** potencial matricial ( $P_m$ ): a matriz do solo retém água (tensão, sucção), e essa retenção é afetada pela estrutura (devido ao maior efeito do espaço poroso e da capilaridade), quando a baixos  $P_m$  (solo mais úmido), e pela textura e matéria orgânica (devido ao maior efeito da área superficial específica), quando em potenciais mais baixos (solo mais seco). Pode ser determinado (Figura F.8) com tensiômetros (0-1bar usados em irrigação), mesa de tensão (separação da micro e macroporosidade) ou câmaras de pressão com membranas porosas (potenciais bem baixos). O potencial matricial existe em solo não saturado, pois temos interface água-ar e formação de meniscos da água nos poros.

**c.** potencial de pressão ( $P_p$ ): esse potencial só existe quando o solo está totalmente saturado e, sobre ele, há uma lâmina de água exercendo pressão. Veja que, nesse caso, não há potencial matricial;

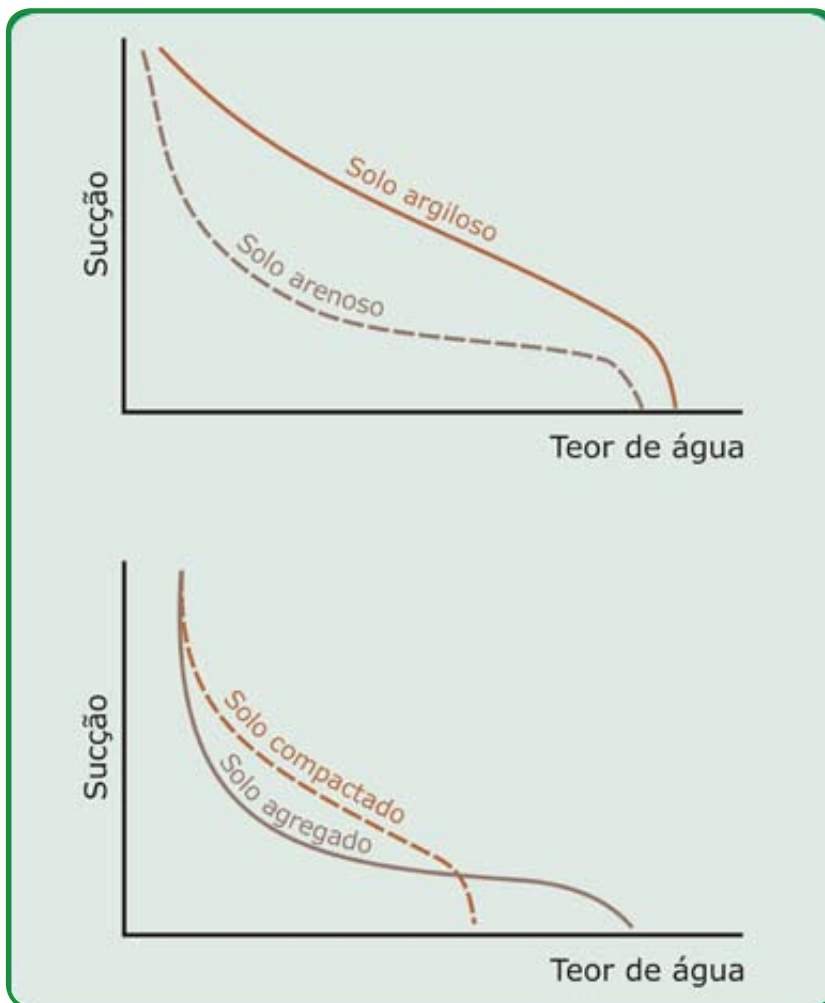
**d.** potencial osmótico ( $P_o$ ): refere-se ao potencial devido à diferença na concentração de sais na presença de membranas semi-permeáveis, como a raiz de uma planta. Como a concentração de sais é normalmente baixa, o  $P_o$  é omitido na determinação do  $P_t$ .



**Figura F.8** - Equipamentos usados na determinação do potencial matricial de água no solo: tensiômetro (à esquerda), mesa de tensão (ao centro) e câmaras de pressão (à direita).



Muitas vezes, nos interessa saber qual a relação entre teor de água e seu potencial. A essa relação chamamos de 'curva de retenção de água no solo' (Figura F.9). Tenha em mente que quando a sucção é alta, o potencial matricial é baixo, pois a água está retida fortemente no solo.



**Figura F.9** - Curva de retenção de água no solo, mostrando o efeito da textura e da estrutura do solo.

Note que solos arenosos retêm menos água quando saturados (sucção ou potencial matricial zero), devido à menor porosidade total em relação a solos argilosos. Quando drenam, há uma rápida perda de água, sem que a sucção varie muito e, finalmente, há uma grande variação na sucção, sem grande mudança na umidade. Isso nos diz que há predominância de poros grandes. Já solos argilosos têm uma mudança menos brusca na curva de retenção, pois a distribuição de tamanho de poros é mais homogênea. Quando mais seco, o solo arenoso retém menos água que o argiloso, devido à menor área superficial



específica das areias.

A compactação do solo altera a estrutura, normalmente com diminuição na porosidade total e alteração da distribuição de tamanho dos poros, com possibilidade de aumento de mesoporos. Contudo, como a área superficial das partículas do solo não é afetada, as duas curvas se encontram quando a sucção é alta (potencial matricial baixo) e a umidade bastante baixa.

### 4.3. Disponibilidade de água às plantas

Nem toda a água no solo está disponível para as plantas. Uma parte drena muito rapidamente e é chamada de 'água gravitacional', e outra é fortemente retida no solo, de modo que as plantas são incapazes de aproveitá-la.

Os limites de disponibilidade são divididos em superior ou capacidade de campo (CC) e em inferior ou ponto de murcha permanente.

A capacidade de campo é a quantidade de água que permanece na zona de transmissão da água durante a infiltração. Pode ser medida no campo, que é a forma mais apropriada, após uma chuva intensa, que praticamente satura o solo. Após a drenagem do excesso, normalmente em 24 a 48 h (mas isso depende do tipo de solo), determina-se a umidade correspondente. De modo mais simplificado, pode ser determinado também no laboratório, usando colunas de solo ou aplicando uma tensão (sucção) de 0,01 bar (que é igual a 0,01 bar ou 100 kPa).

O ponto de murcha permanente corresponde à umidade do solo no qual a reserva de água se esgota e a planta não recupera a turgidez, mesmo em ambiente com 100 % de umidade relativa do ar. Deveria ser medida diretamente com plantas, mas, como isso é demorado, é estimado como sendo o valor da umidade a uma tensão (potencial matricial) de 15 bar (que é igual a 15 atm ou 1500 kPa).

Note que a retenção de água a 0,01 e 15 bar é feita, normalmente, em câmara de pressão, mostrada anteriormente.

Como dito anteriormente, a água disponível (AD) é a lâmina (m ou cm) de água entre os dois limites e é usada para projetos de irrigação. Assim,  $AD = (U_{v_{CC}} - U_{v_{PMP}}) \times \text{profundidade}$ . Na prática da irrigação, não se deixa a umidade baixar até o PMP, pois, desse modo, as plantas não se recuperam. Assim, a irrigação é feita quando a umidade atinge uma fração desse valor ou quando atinge determinado potencial considerado crítico.

#### ATIVIDADE

**Atividade F5** - Para realizar a atividade, entre em contato com o professor da disciplina.

Talvez você já tenha notado que as plantas secam não só durante secas prolongadas, mas também em solo úmido, quando o ar está muito seco e há muito vento. Isso se deve à existência de um continuum 'solo x planta x atmosfera'.

Enquanto o fluxo de água atender à demanda atmosférica (i.e., toda a água perdida por transpiração nas folhas é repostada pelo solo), a planta se desenvolve adequadamente, permanecendo túrgida. Quando o fluxo de água não atender à demanda evaporativa da atmosfera, a planta passa a perder sua própria água e entra em murcha.

Uma pequena murcha nas horas mais quentes do dia é comum e tolerável, não afetando sensivelmente a produtividade agrícola. Quanto maior a perda de água e mais longo o período de murcha, tanto mais irreversível o processo, ficando a produtividade ameaçada e, em casos extremos, a planta com possibilidade de morte.

#### 4.4. Movimento de água no solo

A água sempre se move do maior para o menor potencial total. Portanto, a força responsável pelo fluxo de água no solo é o gradiente de potencial total ( $\Delta Pt$ ) pela distância ( $x$ ). Mas isso não é o bastante. O solo tem de ser permeável ao fluxo. Assim, outra variável é a condutividade hidráulica ( $K_{(\theta)}$ ) do solo.

O  $K_{(\theta)}$  é o fator que expressa a facilidade de transmissão de água no espaço poroso. Quanto maior o  $K_{(\theta)}$ , mais facilmente a água se move no solo. Seu valor depende da textura, estrutura, composição mineralógica e matéria orgânica do solo.

O fluxo ( $q$ ), que é o volume de água que atravessa uma unidade de área por unidade de tempo, pode ser calculado pela equação de **Darcy**:  $q = K_{(\theta)} \times \Delta Pt / \Delta x$

Talvez você esteja se perguntando: por que há um ( $\theta$ ) junto da condutividade  $K$ ? Em linguagem matemática, isso quer dizer que  $K$  é uma função (i.e., seu valor é dependente) da umidade  $\theta$  (ou poderíamos colocar  $U$ ).

#### PERSONALIDADE



Henry Philibert Gaspard Darcy (1803-1858) foi um engenheiro e cientista francês, que fez inúmeras contribuições ao tema 'hidráulica'. A equação de Darcy foi desenvolvida enquanto dimensionava o sistema de tratamento de águas para a cidade de Dijon, na França. Foto modificada de Wikipedia The Free Encyclopedia ([http://en.wikipedia.org/wiki/Henry\\_Darcy](http://en.wikipedia.org/wiki/Henry_Darcy)).

Quando todos os poros do solo estão preenchidos com água, diz-se condutividade hidráulica em solo saturado ( $K_{(0sat)}$ ) e seu valor é máximo. Contudo, com o secamento do solo, os poros maiores drenam primeiro e, com isso, há uma menor área para o fluxo, de modo que a tortuosidade do fluxo aumenta. Assim, temos condutividade hidráulica em solo não saturado ( $K_{(0)}$ ) e seu valor, dependendo da umidade, é muitas vezes menor que o  $K_{(0sat)}$ . Conseqüentemente, o fluxo também diminui drasticamente.

O manejo do solo afeta tanto a condutividade quanto o armazenamento de água no solo. Como a água é um bem precioso, é melhor permitir sua infiltração e armazenamento no solo do que o escoamento superficial e à perda para fora da lavoura.

## 5. Aeração do solo

A disponibilidade de ar no solo também influencia o crescimento de plantas. Pelo processo de respiração, as plantas absorvem o oxigênio ( $O_2$ ) presente no solo e liberam dióxido de carbono ( $CO_2$ ), à exceção de plantas adaptadas a ambientes alagados, as quais possuem a habilidade de retirar o  $O_2$  da atmosfera. Para que ocorra uma respiração adequada, o solo deve ser bem aerado e possuir uma boa taxa de difusividade para manter a relação  $O_2/CO_2$  adequada para o bom desenvolvimento das plantas. Microorganismos presentes no solo também respiram e, em solos com um déficit de  $O_2$ , eles podem competir com as plantas.

Solos alagados ou que apresentam impedimentos à drenagem e solos compactados são solos que podem inibir ou até mesmo impedir o bom desenvolvimento das plantas devido à escassez de  $O_2$ . Pelo fato de a fração de ar estar intimamente ligada ao teor de água no solo, um índice de aeração só deve ser utilizado quando estiver relacionado a valores específicos de umidade.

## 6. Temperatura do solo

A temperatura do solo é um fator variável no tempo e no espaço, assumindo grande importância nos processos físicos do solo e nas trocas de energia com a atmosfera. A temperatura determina as taxas de evaporação e aeração do solo, assim como o tipo e a intensidade das reações químicas.

A variação na temperatura influencia diretamente na germinação, crescimento radicular e na absorção de água e nutrientes. A taxa de crescimento radicular é influenciada pela temperatura do solo e de-

### CONTEÚDO RELACIONADO

Estratégias de uso e manejo do solo e da água serão estudadas em outras disciplinas deste curso.

pendente de dois processos: crescimento (alongação das células ou aumento do comprimento e diâmetro) e desenvolvimento (aparecimento de novas raízes e órgãos de reprodução).

As raízes absorvem mais água, à medida que a temperatura aumenta, até atingir o limite de 35°C, e em temperaturas superiores, há redução na absorção de água. Altas temperaturas do ar podem reduzir a produtividade da cultura pela redução do ciclo vegetativo e abortamento de flores, enquanto altas temperaturas do solo impedem a germinação das sementes.

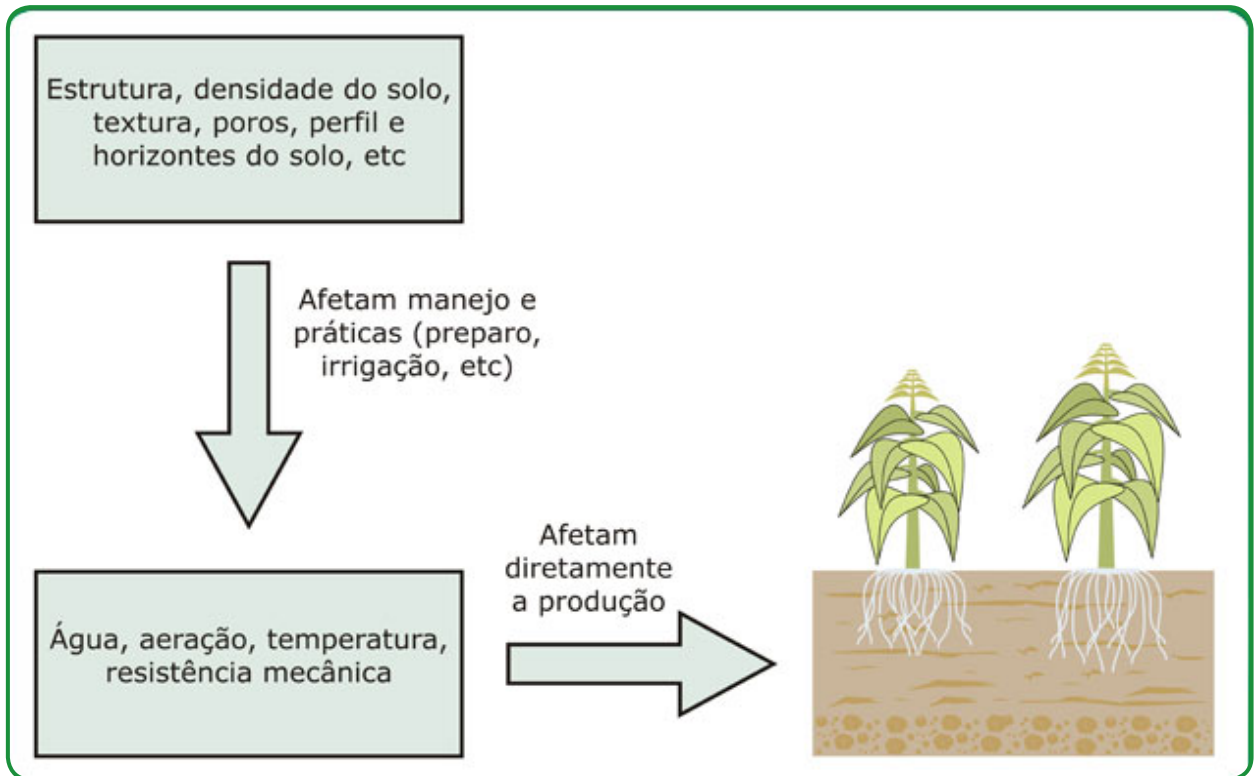
A fonte de calor é a radiação solar que chega à superfície do solo. Parte dessa radiação é absorvida por uma pequena camada de solo e parte é refletida pela superfície. A energia absorvida serve para: aquecer o solo, aquecer o ar do solo e proporcionar a evaporação da água do solo. Uma parte da energia o solo emite em forma de radiação de onda longa.

O calor utilizado para aquecer o solo é transmitido no solo por condução, no contato direto das partículas de solo, ou por convecção no interior da rede de poros existentes no solo.

A temperatura do solo depende da sua composição, densidade, teor de água e cobertura vegetal. O manejo do solo pode afetar diretamente a sua temperatura, e o preparo convencional favorece a evaporação da água do solo e diminui a condutividade térmica da camada arada. Devido à maior condutividade térmica da água, um solo úmido se esfria com maior intensidade em relação a um solo seco.

## **7. Limites físicos ao crescimento de plantas**

Água, oxigênio, temperatura e impedimento mecânico do solo afetam direta e completamente (Figura F.10) o crescimento de plantas nos diferentes estádios de crescimento, da emergência das plântulas à penetração das raízes.



**Figura F.10** - Propriedades do solo, fatores de crescimento de plantas e produção de plantas.

O teor de água do solo controla aeração, temperatura e impedimento mecânico (Figura F.11), os quais são afetados pela densidade do solo e pela distribuição do tamanho dos poros. O aumento no teor de água reduz a aeração e a resistência do solo à penetração. O primeiro efeito é indesejável, ao passo que o segundo é desejável (Letey, 1985). A umidade do solo também diminui a temperatura do solo, pois aumenta a condutividade térmica e o calor latente. Esses fatores físicos interagem e regulam o crescimento e a funcionalidade das raízes, baseados em limites críticos associados ao ar, à água e à resistência do solo, com reflexos no crescimento e na produtividade dos cultivos.



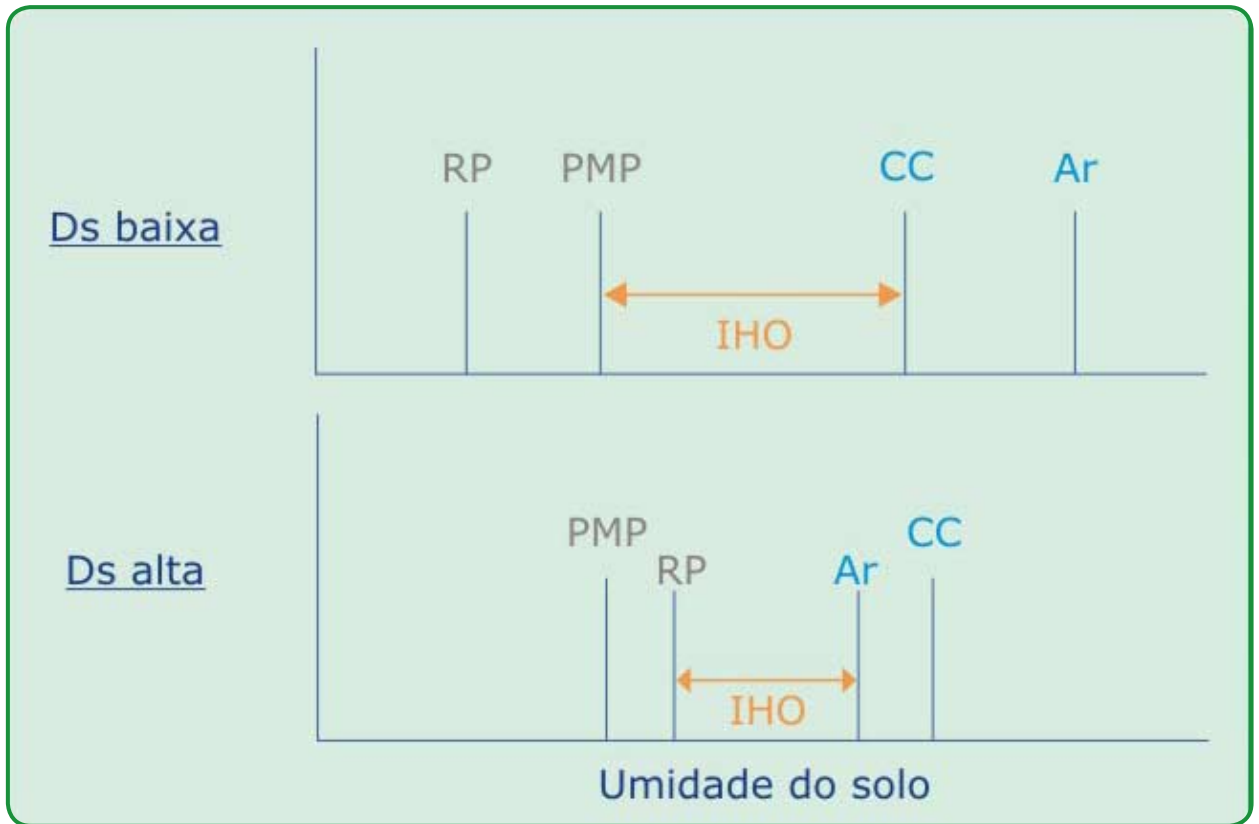
**Figura F.11** - Relação da umidade com a aeração, a resistência à penetração e a temperatura do solo.

O intervalo hídrico ótimo (IHO) é considerado um índice de qualidade estrutural do solo, pois integra num só índice os fatores físicos que estão diretamente relacionados com o desenvolvimento das plantas. Tais fatores são:

- a. porosidade de aeração ( $A_r$ ) superior a 10%;
- b. água no solo a tensões entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP); e
- c. teor de água no solo em que a resistência mecânica (RP) do solo é inferior a 2 MPa.

O IHO fica mais estreito à medida que o estado de compactação aumenta (aumento da densidade do solo) e ocorre a degradação da estrutura (Figura F.12). Por exemplo, a aeração do solo pode restringir a difusão de oxigênio e, por consequência, o crescimento radicular à umidade mais baixa que a capacidade de campo, assim como a resistência do solo à penetração pode restringir crescimento à umidade maior que a correspondente ao ponto de murcha permanente. Culturas produzidas em solos com pequeno IHO são mais vulneráveis à queda de produtividade por falta ou excesso de água do que solos com grande valor de IHO.

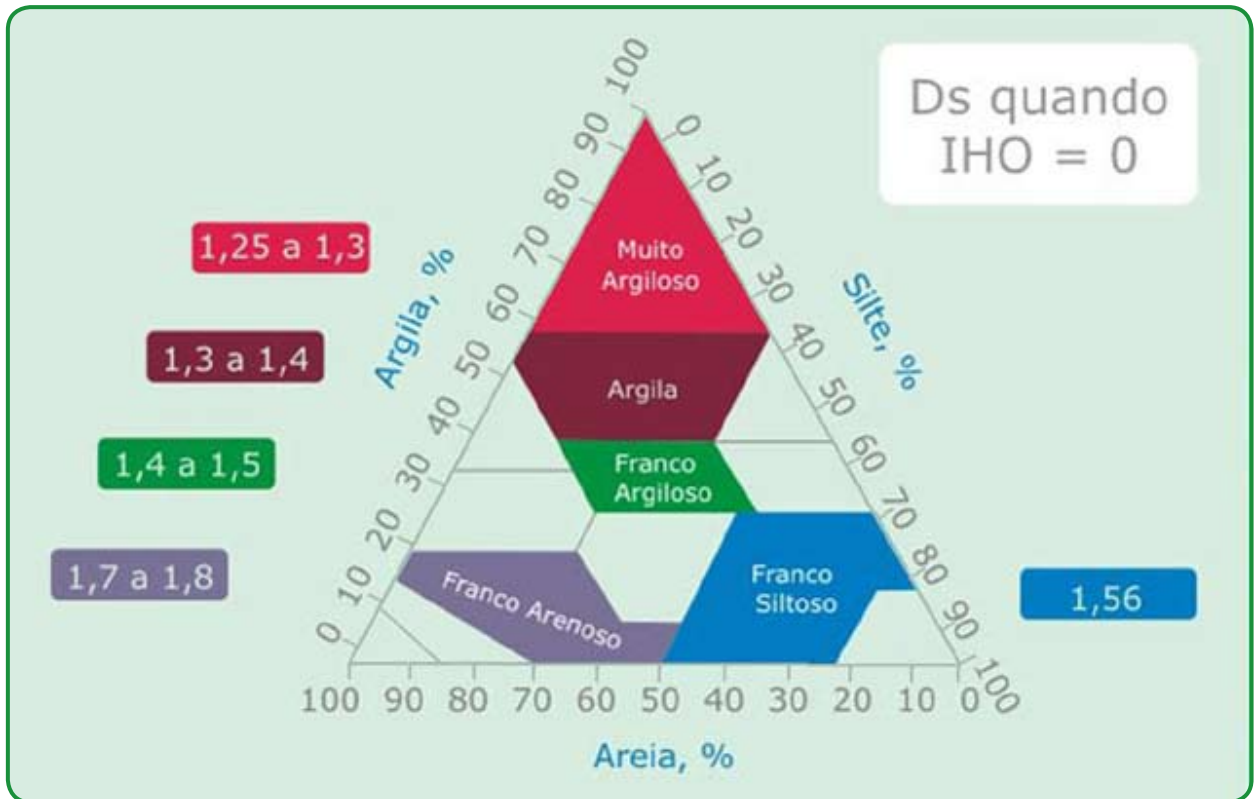




**Figura F.12** - Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO) com a compactação ou degradação da estrutura do solo. Solo estruturado corresponde à Ds baixa e solo compactado, à Ds alta.

Na densidade do solo, quando o IHO é zero ( $Ds_{IHO=0}$ ), a probabilidade da umidade do solo estar fora do índice ótimo é muito grande e, portanto, o risco às culturas é alto. No entanto, é possível que esse valor ainda não seja o crítico, pois valores maiores podem ser críticos e impeditivos. Uma dificuldade inerente à definição de valor crítico é estabelecer se um dado processo (ex.: crescimento de raízes) ou resultado (ex.: produção de grãos) é afetado em determinado grau estabelecido (restritivo) ou totalmente paralisado (impeditivo).

Assim, percebe-se, na Figura F.13, que a densidade do solo crítica ao desenvolvimento das plantas aumenta à medida que aumenta o teor de areia ou, alternativamente, diminui o teor de argila.



**Figura F.13** - Variação de valores de densidade do solo quando o IHO é zero ( $D_s$  em  $Mg\ m^{-3}$ ), para distintas classes texturais. Fonte: Adaptado de Reichert et al. (2003).

## 8. Aplicação: O agricultor avaliando qualidade do solo

O solo funciona como parte do agroecossistema. O agricultor e o técnico de campo podem usar indicadores qualitativos diretamente na propriedade rural, os quais são de grande importância e devem servir de guia para o manejo dos solos agrícolas.

A análise de indicadores quali-quantitativos deve ser feita em tempos estratégicos (Figura F.14). A drenagem lenta, a aparência das plantas, a presença de organismos vivos, entre outros, dão uma boa indicação da qualidade do solo.

O indicador de qualidade de maior sucesso é como as raízes 'vêm' o ambiente do solo abaixo da superfície (Reichert et al., 2003). Para tanto, abre-se uma trincheira, com uma planta no estágio de maior desenvolvimento radicular (75% do florescimento), no centro de uma das paredes e, com auxílio de um objeto pontiagudo, expõe-se parte do sistema radicular.

As raízes expostas são analisadas visualmente, tentando-se perce-

ber se há sinais de limitações físicas. Características como direção, espessura e aprofundamento das raízes são indicadores freqüentemente empregados na identificação de restrições.

Indicador	Época de Avaliação	Qualidade estrutural		
		Pobre	Média	Boa
<b>Indicadores físicos</b>				
1. Compactação subsuperficial	Boa umidade do solo	Solo resistente; aparência laminar; difícil de penetrar objeto pontiagudo	Alguma resistência a objetos pontiagudos	Solo friável
2. Boa estrutura	Boa umidade do solo	Aspecto maciço	Superfícies de fraqueza clara	Granular
3. Aeração	Crescimento de plantas	Poucos poros visíveis e drenagem limitada	Superfícies de fraqueza clara	Solo aberto e bioporos comuns
4. Profundidade efetiva	Qualquer	Subsolo exposto	Evidências de perda horizonte A	Horizonte A profundo
5. Infiltração	Após chuva	Água escoou ou permanece na superfície	Água penetra	Sem escoamento ou empoçamento
6. Drenagem	Após chuva	Solo úmido por longo tempo	Algum empoçamento	Água se move rapidamente
7. Retenção de água	Crescimento de plantas	Estresse após poucos dias	Plantas "sentem" seca	Estresse somente em seca extrema
8. Cobertura superficial	Qualquer	Exposto	Alguma cobertura, <30%	100% cobertura
<b>Indicadores biológicos (planta)</b>				
1. Compactação subsuperficial	Úmido na superfície	Sem sinal	Alguns bioporos: de 2 a 10/m <sup>2</sup>	Bioporos: > 10/m <sup>2</sup>
2. Raízes	75% floração	Concentrada na superfície	Algumas se aprofundam	Raízes profundas sem sinal de restrição
3. Resistência à seca	Seca	Plantas não se recuperam	Sem sinal Sofrem	Suportam
4. Aparência da cultura	Ciclo	Folhas curtas e descoloridas	Crescimento médio e manchado	Densa, verde e alta
5. Produção	Colheita	Abaixo da média	Média local	Acima da média

**Figura F.14** - Indicadores físicos do solo e biológicos relacionados às plantas, usados para avaliar a qualidade dos solos.  
Fonte: Adaptado de Reichert et al. (2003).

Em suma, é importante ter dados científicos e conhecer processos físicos. Mas isso de nada adianta se não houver bom senso e olho atento. Uma pá, um canivete e um observador atento são as mais poderosas ferramentas para avaliar a qualidade do solo.

O olhar deveria ser como o do tatu: por cima da terra e para dentro do solo.

## 9. Atividades finais

### ATIVIDADE

**Atividade F6, F7 e F8** - Para realizar a atividade, entre em contato com o professor da disciplina.

## 10. Bibliografia

### 10.1. Bibliografia básica da Unidade F

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **The nature and properties of soils**. 11 ed. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1996. 740p.

JUMA, N. **The pedosphere and its dynamics: A systems approach to soil science. V.1. Introduction to soil science and soil resources**. Edmonton, Canadá: Salman Productions, 1999. 315p.

KIEHL, J. E. **Manual de edafologia**. São Paulo: Ceres, 1979. 264 p.

KONHKE, H. **Soil physics**. New York, USA: McGraw Hill, 1968. 224p.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, v.27, p.29-48, 2003.

### 10.2. Bibliografia complementar da Unidade F

LETEY, J. Relationship between soil physical conditions and crop production. **Advances in Soil Science**, v.1, p.277-293, 1985.