

OLERICULTURA



CARACTERIZAÇÃO E CONSERVAÇÃO DE SOLOS

SISTEMA FAEP



SENAR – ADMINISTRAÇÃO REGIONAL DO ESTADO DO PARANÁ

CONSELHO ADMINISTRATIVO

Presidente: Ágide Meneguette

Membros Titulares

Rosanne Curi Zarattini
Nelson Costa
Darci Piana
Marcos Junior Brambilla

Membros Suplentes

Livaldo Gemin
Robson Mafioletti
Ari Faria Bittencourt
José Amauri Denck

CONSELHO FISCAL

Membros Titulares

Sebastião Olímpio Santarozza
Paulo José Buso Junior
Carlos Alberto Gabiatto

Membros Suplentes

Ana Thereza da Costa Ribeiro
Ciro Tadeu Alcântara
Aparecido Callegari

Superintendente Adjunto

Carlos Augusto Albuquerque

NEYDE FABÍOLA BALAREZO GIAROLA

**CARACTERIZAÇÃO E CONSERVAÇÃO DE SOLOS
PARA OLERICULTURA**



2015

Depósito legal na CENAGRI, conforme Portaria Interministerial n. 164, datada de 22 de julho de 1994, e junto a Fundação Biblioteca Nacional e Senar-PR.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida, por qualquer meio, sem a autorização do editor.

Autor: Neyde Fabíola Balarezo Giarola

Coordenação técnica: Vanessa Reinhart – CREA PR-122367/D e Luis Guilherme Paraná Barbosa Lemes

Coordenação metodológica: Patrícia Lupion Torres

Normalização: Rita de Cassia Teixeira Gusso – CRB 9./647

Coordenação gráfica: Adilson Kussem

Diagramação: Sincronia Design

Capa: Adilson Kussem

Fotografias: Neyde Fabíola Balarezo Giarola, Dácio Antônio Benassi e Mario Rafael Tolomeoti Nicolau.

Catálogo no Centro de Editoração, Documentação
e Informação Técnica do SENAR-PR.

Giarola, Neyde Fabíola Balarezo.

Caracterização e conservação de solos para olericultura / Neyde Fabíola Balarezo Giarola. – Curitiba : SENAR - Pr., 2015. – 112 p.

ISBN: 978-85-7565-123-0

1. Agricultura. 2. Solos. 3. Olericultura. 4. Erosão. 5. Matas ciliares. I. Título.

CDU631.4

IMPRESSO NO BRASIL – DISTRIBUIÇÃO GRATUITA



APRESENTAÇÃO

O SENAR Nacional – Serviço Nacional de Aprendizagem Rural – é uma instituição prevista na Constituição Federal e criada pela Lei nº 8.315, de 23/12/1991. Tem como objetivo a formação profissional e a promoção social do homem do campo para que ele melhore o resultado do seu trabalho e com isso aumente sua renda e a sua condição social.

No Paraná, o SENAR é administrado pela Federação da Agricultura do Estado do Paraná – FAEP – e vem respondendo por amplo e diversificado programa de treinamento.

Todos os cursos ministrados por intermédio do SENAR são coordenados pelos Sindicatos Rurais e contam com a colaboração de outras instituições governamentais e particulares, Prefeituras Municipais, cooperativas e empresas privadas.

O material didático de cada curso levado pelo SENAR é preparado de forma criteriosa e exclusiva para seu público-alvo, a exemplo deste manual. O intuito não é outro senão o de assegurar que os benefícios dos treinamentos se consolidem e se estendam. Afinal, quanto maior o número de trabalhadores e produtores rurais qualificados, melhor será o resultado para a economia e para a sociedade em geral.



SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	7
1 A IMPORTÂNCIA DOS SOLOS E SUA CONSERVAÇÃO	9
1.1 DEFININDO O SOLO	9
1.2 AS FUNÇÕES DO SOLO	11
2 COMO SÃO OS SOLOS?	13
2.1 A MORFOLOGIA DOS SOLOS	13
2.2 A COMPOSIÇÃO DOS SOLOS	14
2.2.1 A fase sólida	15
2.2.2 A fase líquida	24
2.2.3 A fase gasosa	28
3 ATRIBUTOS DO SOLO QUE INFLUENCIAM O DESENVOLVIMENTO DAS PLANTAS	29
3.1 TEXTURA DO SOLO	29
3.1.1 Natureza das frações do solo	30
3.1.2 Influência da textura sobre os atributos do solo	33
3.1.3 Classificação textural	34
3.2 ESTRUTURA DO SOLO	36
3.2.1 Tipos de estrutura do solo	37
3.2.2 Fatores que afetam a formação de agregados	41
3.2.3 A estrutura adequada para o desenvolvimento das plantas	42
3.3 POROSIDADE DO SOLO	43
3.3.1 Tamanho e forma dos poros	43
3.4 ÁGUA E AERAÇÃO DO SOLO	45
3.4.1 Água disponível e enraizamento	48
3.5 MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO	48
3.5.1 Os benefícios da matéria orgânica	49
3.6 CAPACIDADE DE TROCA DE CÁTIOS (CTC)	55
3.6.1 Fatores que afetam a CTC	56
3.7 O pH DOS SOLOS	58
3.7.1 Determinação do pH do solo	58
3.7.2 Influência do pH do solo sobre o crescimento das plantas	58
3.7.3 Problemas de pH do solo	58
4 OS SOLOS DO PARANÁ	61
4.1 OS SOLOS DA OLERICULTURA PARANAENSE	61
5 PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO DOS SOLOS E SEU CONTROLE	67
6 EROSÃO DOS SOLOS	69
6.1 DEFINIÇÃO, MECANISMO E IMPACTOS	69
6.2 FATORES QUE INFLUENCIAM A EROSÃO	71

6.2.1	Chuvas.....	71
6.2.2	Topografia.....	73
6.2.3	Atributos do solo.....	74
6.2.4	Cobertura vegetal ou de resíduos vegetais.....	77
6.2.5	Sistemas de preparo do solo.....	80
6.3	FORMAS DE EROSÃO	81
6.4	MÉTODOS DE PREVENÇÃO E CONTROLE DA EROSÃO	82
6.4.1	Uso das terras conforme aptidão agrícola.....	82
6.4.2	Implantação de matas ciliares.....	83
6.4.3	Uso de cobertura morta.....	83
6.4.4	Uso de fertilizantes e corretivos.....	84
6.4.5	Sistemas conservacionistas de cultivo.....	84
6.4.6	Rotação de culturas.....	85
6.4.7	Consociação de culturas.....	86
6.4.8	Cultivo em nível	87
6.4.9	Terraceamento.....	88
7	COMPACTAÇÃO DOS SOLOS.....	91
7.1	CAUSAS DA COMPACTAÇÃO.....	91
7.1.1	Compactação superficial.....	92
7.1.2	Compactação subsuperficial.....	93
7.2	CONSEQUÊNCIAS DA COMPACTAÇÃO.....	94
7.3	MONITORAMENTO E AVALIAÇÃO DA COMPACTAÇÃO.....	96
7.4	MÉTODOS DE PREVENÇÃO E CONTROLE DA COMPACTAÇÃO.....	99
8	SALINIZAÇÃO DOS SOLOS.....	101
8.1	DEFINIÇÃO, MECANISMOS E IMPACTOS.....	101
8.2	MÉTODOS DE PREVENÇÃO E CONTROLE DA SALINIZAÇÃO.....	101
9	ACIDIFICAÇÃO DOS SOLOS.....	103
9.1	DEFINIÇÃO, MECANISMOS E IMPACTOS.....	103
9.2	CORREÇÃO DA ACIDEZ DOS SOLOS	104
	REFERÊNCIAS.....	107



INTRODUÇÃO

No estado do Paraná, são produzidas inúmeras espécies olerícolas e a produção é pulverizada por todas as regiões do Estado, com uma concentração maior em torno das grandes cidades, conhecidas como “cinturões verdes”. A área cultivada, que abrange cerca de 120.000 hectares, constitui uma porcentagem relativamente pequena de terras em comparação às de milho e soja, mas envolve um número grande de pequenos agricultores, que colaboram, nos dias atuais, com cerca de 4% do Valor Bruto da Produção agropecuária (SALVADOR, 2012).

A produção de olerícolas no Paraná é intensiva e adota tecnologias calcadas no imediatismo que, embora proporcionem lucros ao produtor rural em curto prazo, acarretam danos ao meio ambiente. O enfoque no lucro de curto prazo faz com que se trabalhe com as maiores taxas de extração possíveis, o que leva à gestão insustentável do solo e sua degradação.

As áreas cultivadas com espécies olerícolas, em sua grande parte, são submetidas ao sistema de preparo convencional. Esse tipo de preparo é caracterizado pelo uso intensivo de aração e gradagens superficiais – sempre à mesma profundidade – e resulta na destruição da estrutura e na compactação do solo. A degradação da estrutura do solo, combinada com a falta de cobertura vegetal, chuvas de alta intensidade e o uso de solos inaptos para as culturas olerícolas, provoca erosão dos solos e, por sua vez, a degradação das propriedades físicas, químicas e biológicas dos mesmos. Conseqüentemente, ocorrem decréscimos nas potencialidades de produção agrícola e desequilíbrios ambientais.

Os processos de degradação dos solos olerícolas têm despertado preocupação na comunidade científica e incentivado a pesquisa agropecuária a desenvolver novas tecnologias para promover a conservação dos solos nesses sistemas de produção (BRASIL, 2010). Essas tecnologias estão calcadas na diminuição do revolvimento do solo, de modo que possibilitem a exploração mantendo a qualidade e a produtividade do mesmo. Os métodos de manejo, chamados sistemas de manejo conservacionistas, envolvem a seleção de solos com potencial para a olericultura, o preparo mínimo dos solos, o plantio direto, a prática de rotação de culturas, o manejo de resíduos culturais, a manutenção da fertilidade dos solos, além do aumento da infiltração da água das chuvas e da irrigação.

1 A IMPORTÂNCIA DOS SOLOS E SUA CONSERVAÇÃO

A degradação dos solos é um dos maiores problemas do nosso tempo e ameaça diretamente a segurança alimentar mundial, mas tem passado despercebida em detrimento de problemas mais visíveis, como o aquecimento global ou a poluição ambiental (FAO, 2011). A degradação dos solos comumente é causada pelo uso indevido desse recurso natural pelos seres humanos e inclui sua deterioração biológica, física e/ou química. Exemplos dessa degradação são as perdas de matéria orgânica, o declínio da fertilidade química, a diminuição da condição estrutural, erosão, compactação, mudanças adversas na salinidade, acidez ou alcalinidade, os efeitos de produtos químicos tóxicos e poluentes.

No Paraná, o aumento populacional e o desenvolvimento industrial vêm exigindo mais dos solos a cada dia, em função da crescente demanda por alimentos. A necessidade de produzir cada vez mais, e com as fronteiras agrícolas praticamente esgotadas, aumenta os riscos de degradação dos solos. Isso dá novas dimensões à importância desse recurso natural, justificando, dessa forma, a aplicação de investimentos maciços para assegurar o potencial produtivo dos solos.

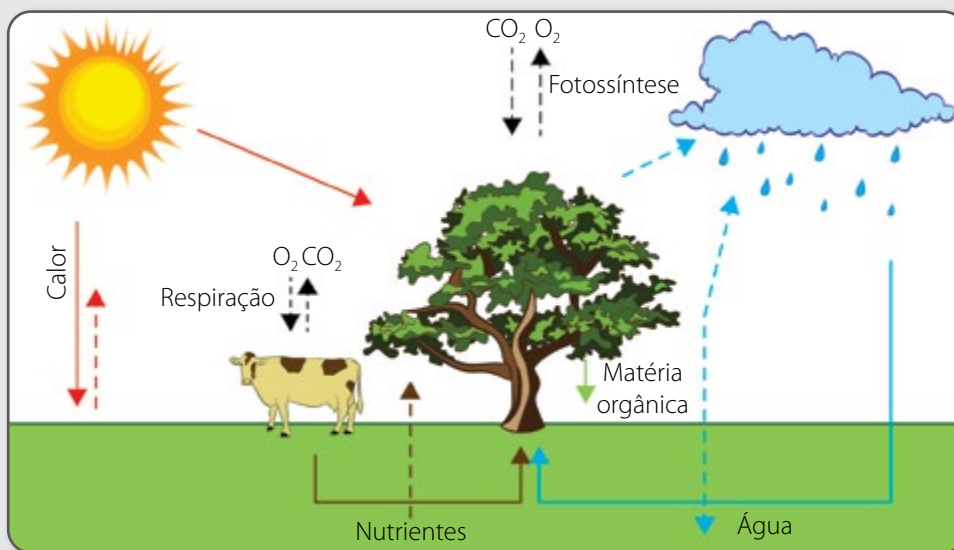
A alternativa mais adequada para diminuir os riscos de degradação dos solos cultivados é a sua conservação. A conservação do solo é definida como “a prevenção, mitigação ou controle dos processos de degradação dos solos por meio da utilização de medidas culturais, vegetativas, estruturais e de gestão da terra, individualmente ou em associações, que permitam a manutenção da estabilidade e produtividade do sistema para as gerações futuras” (FAO, 2011). A adoção de práticas conservacionistas de produção agrícola tende a se tornar um componente de competitividade no mercado, impulsionado pelas normas ISO-14000, que tratam da gestão ambiental das atividades produtivas e pode atender aos anseios da sociedade por produtos que não degradem o ambiente em seu processo de obtenção e proporcionem condições satisfatórias para a sobrevivência do ser humano.

1.1 DEFININDO O SOLO

A palavra “solo”, como muitas palavras comuns, tem vários significados. No sentido tradicional, o **solo é o meio natural para o crescimento de plantas terrestres**. Esse é o entendimento mais comum da palavra e o grande interesse no solo está centrado nesse significado. As pessoas consideram o solo importante porque suporta as plantas que fornecem alimentos, fibras, medicamentos e outras necessidades dos seres humanos e porque ele filtra água e recicla resíduos.

Do ponto de vista científico, o solo é o objeto de estudo da edafologia (*edaphos* = solo; *logos* = estudo), que o define como “indivíduo natural, organizado e independente, cujos constituintes, propriedades e gênese resultam da atuação de uma série de fatores ativos (**clima, organismos, topografia e tempo**) sobre um material passivo (**material de origem ou parental**)” (BUOL et al., 2011). “O solo é um sistema aberto para a atmosfera e para a crosta terrestre, que armazena, de forma temporal, os recursos necessários para os seres vivos” (JUMA, 1999) (Figura 1). A disponibilidade desses recursos (água, energia, nutrientes minerais) depende da intensidade e da velocidade dos processos de troca entre o solo e os outros compartimentos dos sistemas ecológicos.

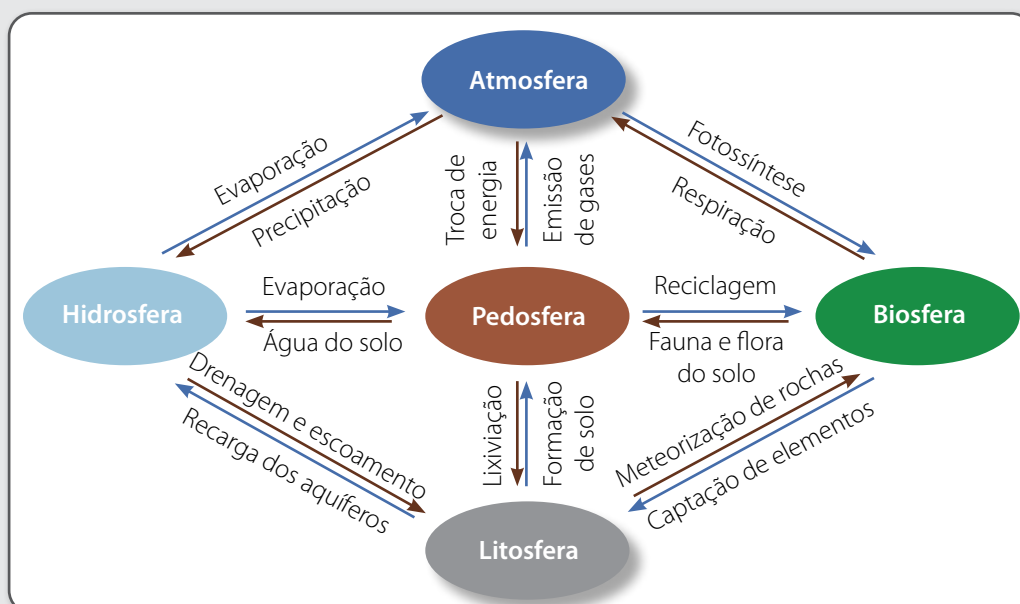
Figura 1 – Esquema dos ciclos e trocas de matéria e energia entre a atmosfera, o solo, a crosta terrestre e os seres vivos.



Fonte: Adaptado de Juma, 1999.

A definição de **solo** foi mudando conforme avançaram os conhecimentos sobre os seus componentes e suas inter-relações. Na definição mais recente apresentada pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos e desenvolvida pelo Soil Survey Staff (1998), o **solo** é definido como um corpo natural que ocupa a superfície da terra, formado por uma fase sólida (minerais e matéria orgânica), uma fase líquida e uma fase gasosa, organizado em horizontes ou camadas de materiais diferentes e a rocha-mãe, como o resultado de adições, perdas, transferências e transformações de matéria e energia, que tem a capacidade de servir como apoio às plantas com raízes, em um ambiente natural. Essa visão do solo como resultado das interações entre os compartimentos atmosfera, litosfera, hidrosfera e biosfera (Figura 2), deu lugar a um conceito de solo como um subsistema dos ecossistemas terrestres.

Figura 2 – O solo (Pedosfera) como resultado da interação entre os compartimentos do meio ambiente.



Fonte: Adaptado de Lal et al., 1998.

O conceito sistêmico de solo implica em três características fundamentais:

- **Complexidade:** o solo apresenta uma atmosfera interna, um armazenamento particular de água, flora e fauna determinadas, partículas minerais e partículas orgânicas específicas, estando todos estes compostos fortemente relacionados.
- **Dinamismo:** o solo adquire progressivamente suas propriedades pela ação combinada com o meio. O material de origem se altera por influência do clima e da vegetação; os resíduos vegetais e animais são atacados pelos microrganismos do solo, formam complexos orgânicos coloidais denominados húmus, que se mineralizam gradualmente; se estabelecem uniões mais ou menos íntimas entre os minerais procedentes da alteração do material de origem e o húmus; as substâncias solubilizadas e as partículas coloidais sofrem migrações. Assim, ao final do processo evolutivo, o solo dá lugar a um ambiente estável e equilibrado com o clima, com a vegetação e com o material de origem. No entanto, esse equilíbrio pode se romper mediante uma modificação significativa do clima ou da vegetação, começando um novo ciclo de evolução.
- **Permeabilidade:** o solo é um sistema aberto. Essa permeabilidade repercute em maior ou menor facilidade de degradação.

1.2 AS FUNÇÕES DO SOLO

Algumas funções são atribuídas aos solos: três de natureza ecológica (1 a 3), duas de natureza técnico-industrial (4 e 5) e uma de natureza sociocultural (6), (BLUM, 1998; HILLEL, 1998).

As funções do solo de natureza ecológica são:

- 1) **Meio de suporte para a produção de biomassa:** está na base da vida humana e animal, uma vez que é ela que assegura o provisãoamento em alimentos, bioenergia e produção de fibras. Assim, o solo é um substrato físico para o sistema radicular das plantas e, simultaneamente, é um substrato nutritivo que assegura a utilização de água e outras substâncias necessárias ao crescimento vegetal.
- 2) **Regulador ambiental:** funciona como filtro, acumulador, amortecedor e transformador de diversos compostos que circulam entre a atmosfera, a hidrosfera e os organismos vivos, fazendo parte integrante do ciclo hidrológico e de outros ciclos biogeoquímicos. Funciona com um complexo reator biofísico-químico onde ocorrem fenômenos de filtração mecânica, adsorção e precipitação à superfície de constituintes inorgânicos e orgânicos do solo e transformações bioquímicas, nomeadamente a mineralização (decomposição) de resíduos da atividade biológica, até à libertação dos elementos minerais constituintes e a sua reintegração nos ciclos biogeoquímicos. Ou seja, tal como se pode ver na Figura 1:
 - filtro, através da separação mecânica entre compostos sólidos e líquidos controlando o transporte até o lençol freático;

- acumulador e amortecedor, pela adsorção e precipitação de compostos poluentes (metais pesados e radioativos), purificando a água que é filtrada por processos físico-químicos;
- transformador, pela alteração e decomposição e reciclagem microbiológica e bioquímica de compostos orgânicos tóxicos (pesticidas, por exemplo), os quais são destruídos, metabolizados ou imobilizados no solo. É um “reator” biofísico-químico

3) Reserva de biodiversidade: por exemplo, o banco de sementes do solo, mas também o meio de crescimento e hábitat de uma miríade de organismos, macro e microscópicos, muitos de espécies ainda desconhecidas, que têm no solo o seu hábitat e que são um enorme manancial genético. Uma vez que já desapareceram algumas espécies e outras se encontram em extinção, torna-se necessário preservar o património genético das espécies ainda existentes.

Os solos também são necessários para a construção de habitações, desenvolvimento industrial, circulação e transportes, equipamentos de tempos livres e desportos, recepção de resíduos, ou seja, desempenham funções de natureza socioeconómica.

- 4) Suporte de infraestrutura:** principalmente vias de comunicação, mas também edifícios.
- 5) Fonte de matérias-primas:** cascalho, fornecimento de água, argila, areia, cascalho, carvão, minerais, turfa, para a produção técnica e industrial ou para fins socioeconómicos.
- 6) Suporte de património natural e cultural:** paisagens protegidas, espaços de lazer, tesouros arqueológicos e paleontológicos, vestígios paleoambientais.

As funções 4 e 5, ou o uso do solo a elas associado, têm normalmente uma natureza destrutiva do solo que não permite conciliá-las com as outras funções. Por outro lado, a importância do solo na produção de biomassa e como regulador ambiental (funções 1 e 2) facilmente nos permite concluir que o solo não deve ser isolado do meio ambiente de que faz parte. Embora sendo mais um componente do meio ambiente, é, simultaneamente, o suporte ou sustentáculo dos ecossistemas terrestres e um produto da sua evolução. Consequentemente e atendendo a que 99% da produção de alimentos e de biomassa são derivados do solo (Sparks, 2000), este também deve ser encarado como suporte ou elemento basilar das sociedades humanas tal como as conhecemos. Não é demais salientar essa perspectiva, em uma época em que se assiste a uma urbanização e a uma evolução tecnológica tão espetacular que, facilmente, nos faz esquecer a dependência e a fragilidade das nossas sociedades de algo tão banal, aparentemente simples ou até “sujo”, para alguns, como é o solo.

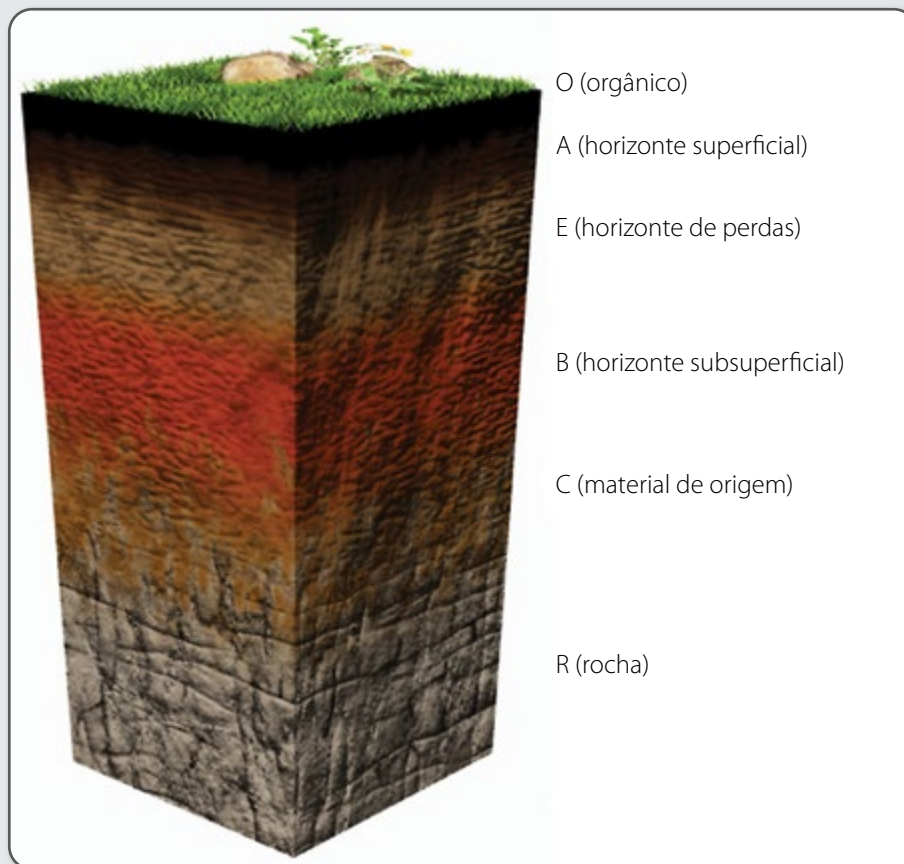
2 COMO SÃO OS SOLOS?

2.1 A MORFOLOGIA DOS SOLOS

Segundo Rosa & Rocha (2003), o solo não é formado apenas pela camada superficial de alguns centímetros que o agricultor cultiva, mas também por outras camadas abaixo dessa. As características do solo variam com a profundidade, em função da maneira pela qual se formou ou depositou, devido às diferenças de temperatura, conteúdo de água, concentração de gases (particularmente CO₂ e O₂) e movimento descendente de solutos e de partículas. Ou seja, os fluxos de material formam diferentes camadas (denominadas horizontes), que podem ser identificadas a partir do exame de uma secção vertical do solo, que é chamada de **perfil do solo** (Figura 3).

Os **horizontes** diferenciam-se pela espessura, cor, distribuição e pelos arranjos das partículas sólidas e poros, distribuição de raízes e outras características, que resultam da interação de fatores influenciadores na formação do solo. A caracterização mais detalhada dos horizontes permite identificar, classificar e planejar o uso mais adequado do solo.

Figura 3 – Representação esquemática de um perfil de solo com suas principais camadas e horizontes.



Fonte: Adaptado de Soil Science Society of America, 2012.

Os horizontes são designados por letras maiúsculas. Assim, as letras **A**, **B** e **C** representam os principais horizontes do solo. As letras **O** e **R** são também utilizadas, para identificar um horizonte orgânico em solos minerais e a rocha inalterada, respectivamente. De acordo com Brady & Weil (2008), as principais características dos horizontes que um solo pode conter são:

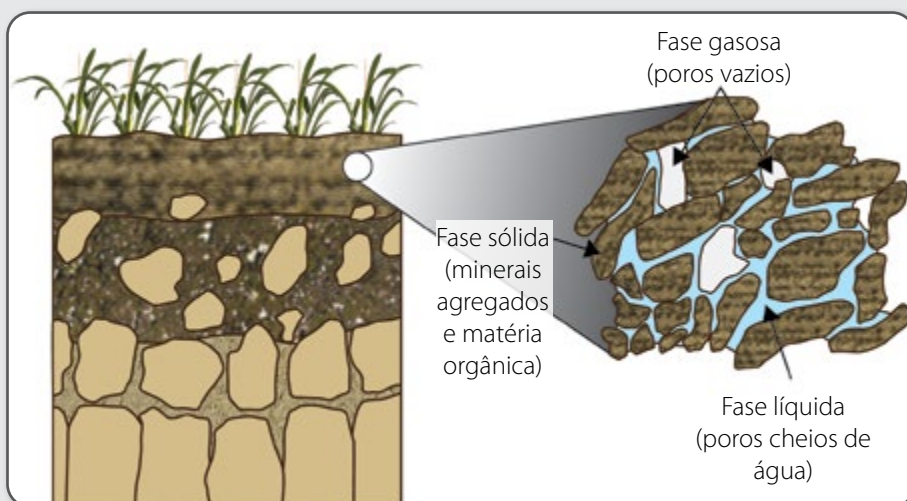
- **O** – camada orgânica com matéria orgânica fresca ou em decomposição. Em condições de má drenagem esse horizonte é denominado **H**.
- **A** – resultante do acúmulo de material orgânico misturado com material mineral. Geralmente, apresenta coloração mais escura, devido ao material orgânico humificado. Em solos onde há eluviação (perda de parte de argila ou matéria orgânica) muito intensa, forma-se uma camada de cores claras com menor concentração de argila abaixo do horizonte A. Essa camada caracteriza o horizonte denominado **E**.
- **B** – horizonte caracterizado pelo acúmulo de argila, ferro, alumínio e pouca matéria orgânica. É denominado de horizonte de acúmulo ou iluvial. O conjunto dos horizontes A e B caracteriza a parte do solo que sofre influência das plantas e dos animais.
- **C** – camada de material não consolidado, com pouca influência de organismos, geralmente apresentando composição química, física e mineralógica similar à do material onde se desenvolve o solo.
- **R** – rocha inalterada, que poderá ser, ou não, a rocha-matriz (ou rocha-mãe) a partir da qual o solo se desenvolveu.

2.2 A COMPOSIÇÃO DOS SOLOS

O solo é um sistema disperso no qual se diferenciam três fases (Figura 4):

- **Fase sólida:** composta por partículas orgânicas e minerais.
- **Fase líquida:** composta pela água ou solução do solo.
- **Fase gasosa:** composta pelo ar (atmosfera) do solo contido nos espaços porosos.

Figura 4 – Esquema demonstrando as fases do solo.



Fonte: Adaptado de Brady; Weil, 2008.

Os sólidos minerais são formados, principalmente, de silício, oxigênio, alumínio, potássio, cálcio, e magnésio. A água do solo, também chamada de solução do solo, contém nutrientes dissolvidos e é a principal fonte de água para as plantas. Os nutrientes essenciais são disponibilizados para as raízes das plantas através da solução do solo. O ar do solo, que está em contato com o ar da superfície (atmosfera), fornece oxigênio para as raízes e ajuda a remover o excesso de dióxido de carbono (CO₂) da respiração das células das raízes.

Quando as partículas minerais e orgânicas se aglutinam, formam-se os agregados do solo. Os agregados geram solos com mais espaços (poros), que vão armazenar água e possibilitar as trocas de gases, como, por exemplo, a entrada do oxigênio que será utilizado pelas raízes das plantas e pelos organismos do solo, e a saída de dióxido de carbono (CO₂) produzido pelos organismos.

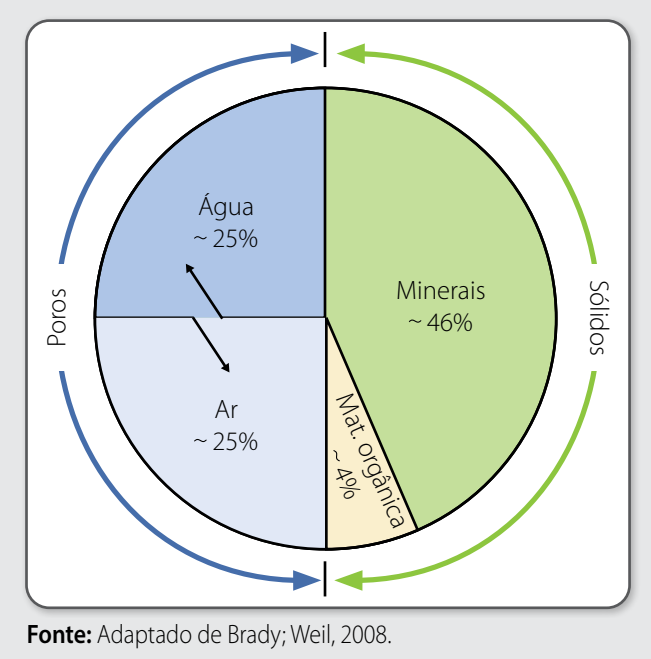
Em volume, a fase sólida, ocupa cerca de 50% do total, enquanto as fases gasosa e líquida dividem o restante do espaço disponível (Figura 5). No entanto, as proporções relativas de cada fase variam de solo para solo e em um mesmo solo, com as condições climáticas, presença de plantas e manejo.

Em geral, na composição volumétrica percentual de um solo que apresenta condições ótimas para o crescimento de plantas, verificam-se em torno de 50% de fase sólida (45% de origem mineral e 5% orgânica), 25% de fase líquida e 25% de fase gasosa (Figura 5). Os quatro componentes (mineral, orgânico, líquido e gasoso) estão intimamente misturados, permitindo a ocorrência de reações e constituindo um ambiente adequado para a vida vegetal (Brady; Weil, 2008).

2.2.1 A fase sólida

A fase sólida representa a fase mais estável do solo e a mais representativa. É uma fase muito heterogênea, formada por **constituintes inorgânicos** (minerais) e **orgânicos** (matéria orgânica). Os minerais constituem a base da estrutura sólida que sustenta o solo. A parte sólida mineral normalmente representa de 45 a 50% do volume do solo, mas dentro dessa fase, a porção mineral constitui 90-99% do volume e os 10-1% restantes correspondem à matéria orgânica (Brady; Weil, 2008).

Figura 5 – Composição do solo em termos de volume.



A fase sólida constitui o esqueleto ou a matriz do solo. A disposição das partículas do esqueleto possibilita a formação de uma quantidade variável de poros. Essa fase é proveniente da decomposição do material de origem e dos resíduos vegetais e é relativamente estável quanto à sua composição e organização, o que geralmente auxilia na caracterização de um solo. A disposição e a acomodação das partículas da fase sólida de solo determinam certos atributos físicos do solo, incluindo: estrutura, porosidade, permeabilidade e densidade.

A fase sólida do solo é a fonte da maioria dos nutrientes das plantas e o depósito da água requerida por elas. Essa fase também determina a eficiência com que o solo desempenha as funções que permitem o desenvolvimento das plantas.

a) **Componentes inorgânicos ou minerais**

Uma parte da fase sólida do solo é formada por componentes inorgânicos ou minerais. Essa parte é constituída por partículas provenientes do intemperismo do material de origem, que pode ser uma rocha ou algum outro tipo de material inorgânico acumulado gradualmente por vários processos (BUOL et al., 2001). A origem do material inorgânico do solo pode ser de vários tipos e pode ser visualizada no quadro 1.

Quadro 1 – Origem do material inorgânico ou mineral do solo.

Rocha	Rochas ígneas	Efusivas (lava)	Basalto Riolito
		Intrusivas	Granitos Gabros Diabásios Basaltos
	Rochas metamórficas	Gnaisses Ardósias Xistos Mármore	
	Rochas sedimentares	Calcários Arenitos	
Material aluvial: material depositado por um rio.			
Material lacustre: material depositado em lagos e depressões, principalmente em climas glaciais.			
Material marinho: sedimentos transportados pelos rios, para o mar e em seguida exposta.			
Material eólico: sedimentos transportados pelo vento.			
Material coluvial: material transportado pelas encostas das montanhas por ação da gravidade.			

Fonte: Adaptado de Buol et al., 2011.

Os minerais do solo (material inorgânico) são resultantes dos processos de alteração dos materiais de origem, conforme descritos a seguir.

- **Processos físicos ou mecânicos:** são os processos que não alteram a composição química do mineral, mas a sua forma ou tamanho. **Mediante os processos físicos, as partículas minerais do material original passam para o solo com diferentes tamanhos**, mas com a mesma natureza química.

- **Processos químicos:** processos que alteram a composição química do mineral. **Através de processos químicos se originam novos minerais**, com a estrutura, composição e propriedades diferentes das do material original. Geralmente, a alteração química forma partículas com diâmetro inferior a 0,002 mm (2 μm), também chamada de **fração argila** dos solos.

No quadro 2 pode-se observar os teores dos principais elementos químicos encontrados nos solos. A análise deste quadro permite verificar a predominância do silício (Si) e do alumínio (Al) na composição dos solos, refletindo a predominância desses elementos nas rochas da superfície. Os altos teores de ferro (Fe) e alumínio (Al) em alguns solos são resultantes de materiais de origem mais ricos e da concentração residual destes elementos pela perda gradativa por lixiviação dos demais elementos.

Quadro 2 – Composição química dos solos.

Elemento químico	Peso atômico G	Conteúdo da litosfera g kg ⁻¹	Faixa de conteúdo comum nos solos g kg ⁻¹
Alumínio	26,98	81	10–300
Carbono	12,01	0,95	–
Cálcio	40,08	36	7–500
Ferro	55,85	51	7–550
Potássio	39,10	26	0,4–30
Magnésio	24,31	21	0,6–6
Manganês	54,94	0,9	0,02–3
Nitrogênio	14,01	-	0,2–4
Oxigênio	16,00	465	–
Fosforo	30,97	1,2	0,2–5
Enxofre	32,06	0,6	0,030–10
Silício	28,09	276	230–350
Titânio	47,90	6	1–10

Fonte: Adaptado de Lindsay, 1979.

Os teores de nutrientes essenciais para as plantas são geralmente baixos nos solos, seja pelos baixos teores nos materiais de origem, seja pelo progressivo empobrecimento pela lixiviação. A maior riqueza química dos solos está associada a materiais de origem mais ricos, solos pouco intemperizados ou condições locais de acumulação. A influência dos materiais de origem na composição do solo decresce à medida que os solos se intemperizam. Solos pouco intemperizados preservam ainda minerais primários, fontes de nutrientes para o solo. Os solos tropicais muito intemperizados não contém minerais primários intemperizáveis, sendo formados quase exclusivamente por minerais secundários (argilas silicatadas e argilas sesquioxídicas) e quartzo (Quadro 3). A perda dos elementos, principalmente dos cátions, se deve à maior solubilidade desses elementos, associada à menor retenção nos sítios de troca dos coloides do solo.

Quadro 3 – Alguns produtos possíveis da intemperização de minerais primários, conforme os materiais de origem (rochas).

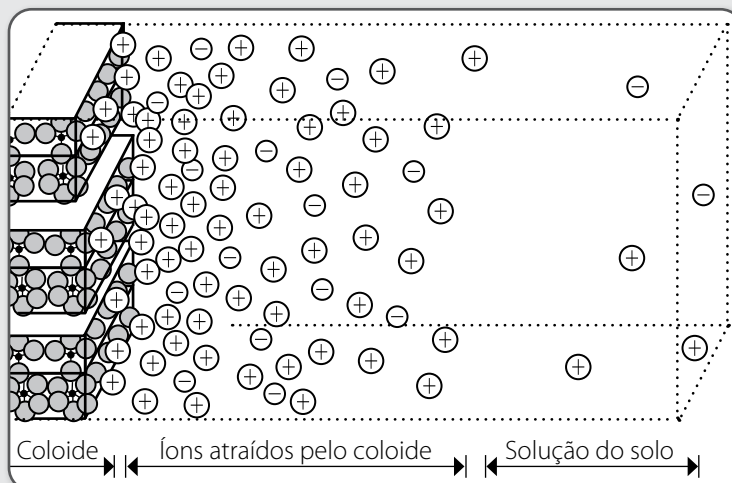
Material de origem (rochas)	Minerais primários	Solos pouco intemperizados	Solos muito intemperizados
		Produtos intermediários	Produtos finais
Ígneas máficas e ultramáficas, metamórficas	Olivinas (Forsterita, Fayalita); Piroxênios (Augita, Diopsido, Hiperstênio); Anfibólios (Hornblenda, Actinolita)	Óxidos hidratados não cristalinos de Al, Si, Fe, Ti	Óxidos cristalinos de Fe e Al ou caulinita
Metamórficas e algumas rochas ígneas félsicas	Micas (Muscovita, Biotita)	Ilita, Montmorilonita ou Vermiculita	Caulinita
Ígneas, metamórficas e sedimentares	Feldspatos (Ortoclásio, Albita, Anortita)	Óxidos hidratados não cristalinos de Al, Si (Alofanas)	Caulinita
Ígneas félsicas, sedimentares clásticas	Quartzo	Silicatos não cristalinos (Calcedônia)	Formas secundárias de quartzo

Fonte: Adaptado de Fields; Swindale, 1954.

Os minerais da fração argila possuem caráter e tamanho coloidal, grande área superficial específica e cargas elétricas superficiais, sendo suscetíveis a fenômenos de superfície como adsorção e troca de íons, com uma solução em que se encontrem imersas. As partículas coloidais podem formar suspensões estáveis e se mover com a água que percola um meio poroso. Partículas de dimensões coloidais, quando colocadas em suspensões, apresentam o chamado *Movimento Browniano*, em função da agitação térmica das moléculas de água. Nesse tamanho, as partículas são pouco afetadas pela força gravitacional, são muito suscetíveis às forças elétricas e passíveis de interações por forças relativamente mais fracas, como pontes de hidrogênio e forças de Van der Waals.

A forma das partículas minerais também é importante, porque influencia área de superfície em contato com o meio. No caso das argilas silicatadas, que possuem forma de placas, este efeito é muito expressivo. A presença de cargas elétricas na superfície das partículas da fração argila (Figura 6) confere a estas a capacidade de interagir com a solução do solo, seja pelos fenômenos de troca, seja pela formação de ligações.

Figura 6 – Esquema demonstrando a retenção de cátions pelos minerais da fração argila.

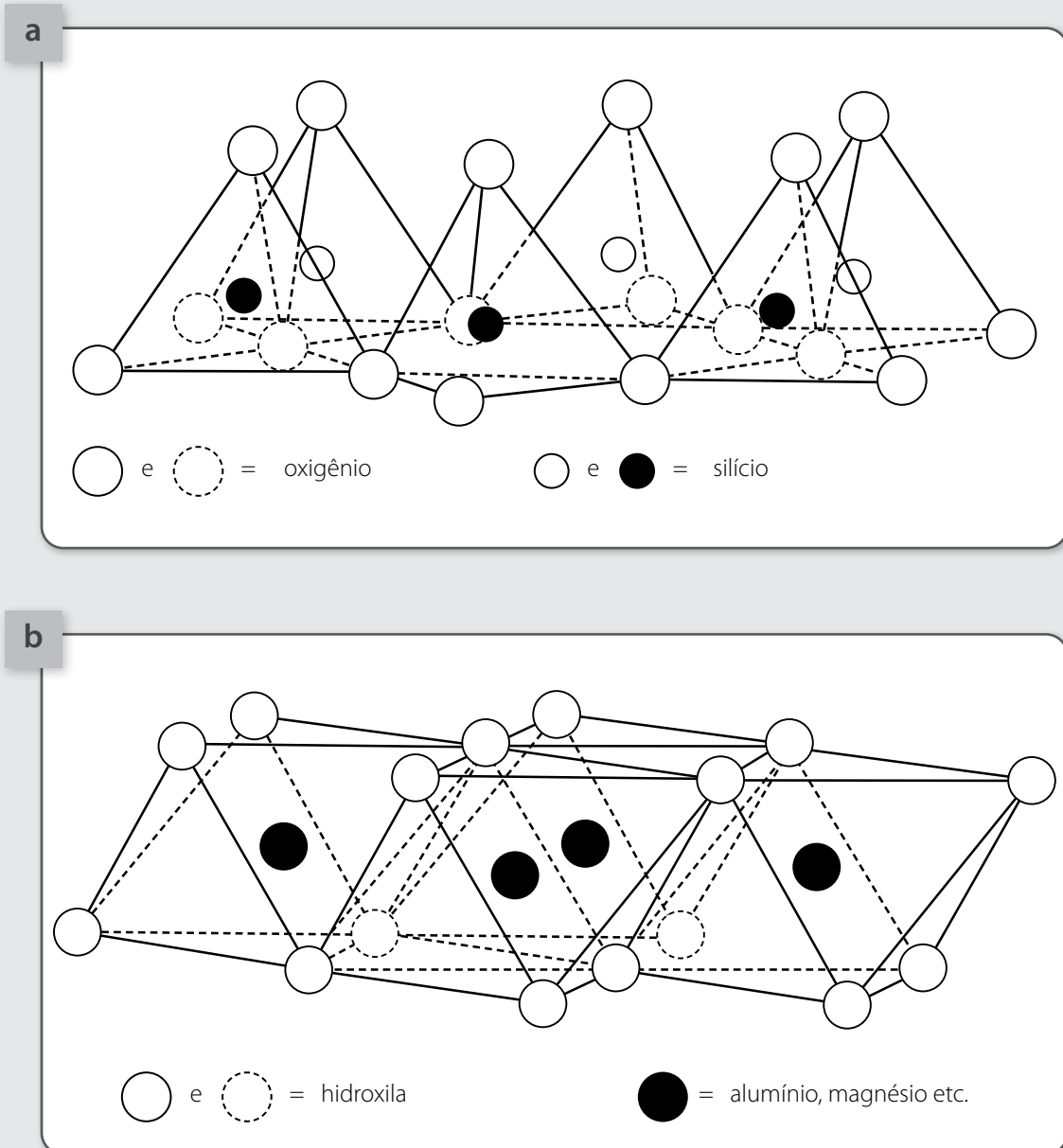


Fonte: Adaptado de Laidler, 1993.

Os minerais mais comuns que compõe a fração argila dos solos brasileiros (argilominerais) são os **aluminossilicatos** (ou argilas silicatadas) e os óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio (ou argilas sesquioxídicas). Como já mencionado, são considerados minerais secundários porque resultam da decomposição de minerais primários, ou seja, dos processos de modificação química das rochas.

As argilas silicatadas do solo são formadas, basicamente, por Si, Al e O, bem como outros elementos, tais como Na, K, Ca, Mg, Fe, etc. Essas argilas pertencem ao grupo dos filossilicatos, ou seja, são minerais compostos por camadas resultantes do empilhamento de folhas ou lâminas de tetraedros de silício e octaedros de alumínio (Figura 7) ou seus substituintes isomórficos. Nos solos brasileiros as argilas silicatadas mais comuns são as caulinitas.

Figura 7 – Lâminas de tetraedros de silício (a) e octaedros de alumínio (b) que compõe as argilas silicatadas dos solos.



Fonte: Kämpf et al., 2012.

Os óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio são minerais originados da precipitação dos íons liberados e oxidados após a destruição do retículo cristalino dos minerais primários (no caso de ferro), ou do intemperismo das argilas ou minerais primários em condições severas (no caso do alumínio). Estes argilominerais podem ter tamanho e grau de cristalinidade variado, podendo ser encontrados como cristais isolados, como recobrimento de agregados e partículas, formando cimentantes, ou associados à matéria orgânica.

Os principais óxidos de ferro e alumínio encontrados no solo são:

- 1) Hematita: óxido de ferro anidro ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), responsável pela cor vermelha brilhante dos solos.
- 2) Goetita: oxidróxido de ferro ($\alpha\text{-FeOOH}$), responsável pela coloração amarelada dos solos.
- 3) Ferridrita: óxido de ferro de baixa cristalinidade, resultante da precipitação de ferro reoxidado em ambientes hidromórficos.
- 4) Gibbsita: hidróxido de alumínio ($\text{Al}(\text{OH})_3$), constituinte importante da fração argila de vários solos brasileiros.

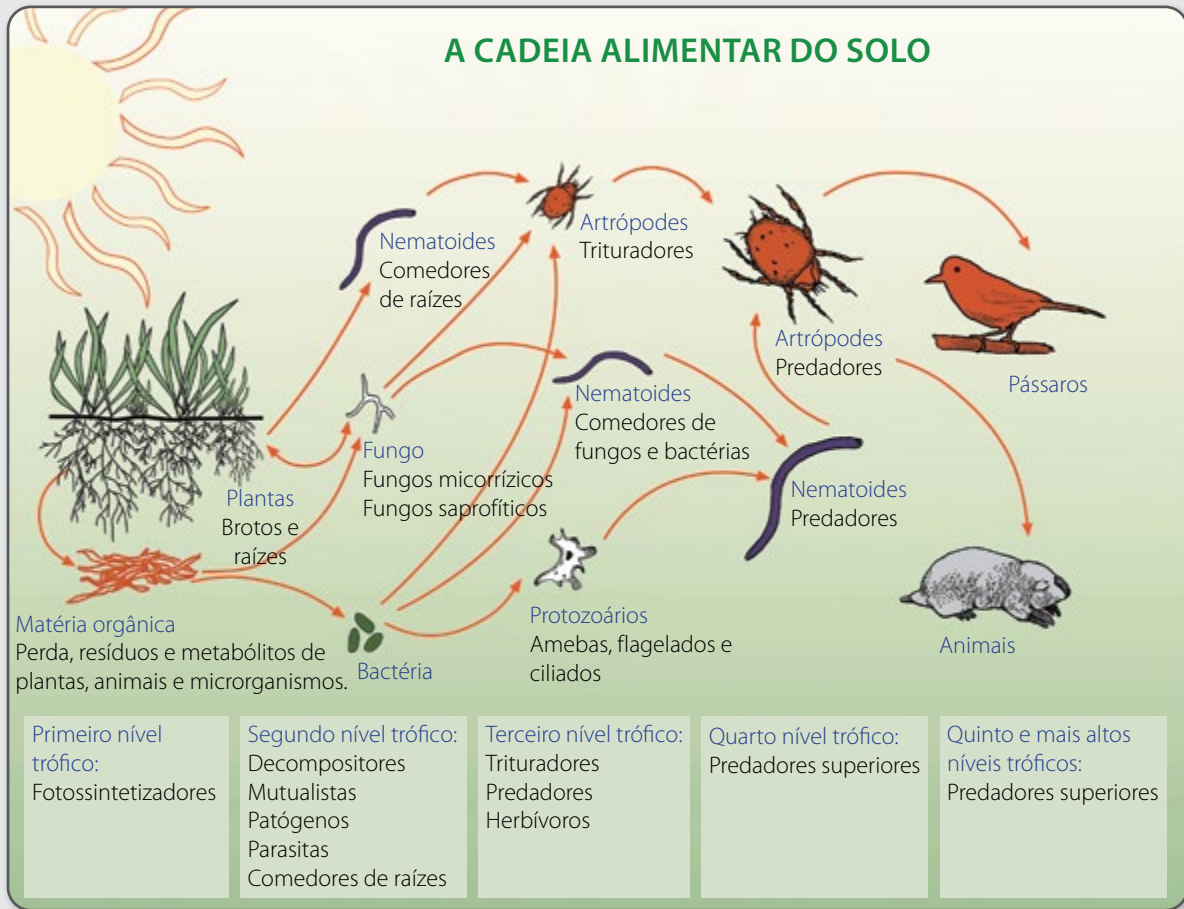
b) **Componentes orgânicos**

Outra parte da fase sólida do solo é formada por componentes orgânicos ou matéria orgânica do solo. A **parte orgânica** é formada de substâncias provenientes de plantas e animais mortos, bem como produtos intermediários da degradação biológica feita por bactérias e fungos. O material orgânico de fácil decomposição é transformado em gás carbônico, água e sais minerais. Nos solos férteis, com densa vegetação, existe uma complexa fauna constituída de pequenos mamíferos, tais como ratos e outros roedores, e minúsculos protozoários, minhocas, insetos e vermes, os quais têm função muito importante na trituração, aeração, decomposição e mistura da matéria orgânica no solo.

A matéria orgânica tem um efeito determinante sobre quase todas as propriedades do solo, embora esteja presente em quantidades relativamente pequenas. Um solo agrícola típico contém de 1% a 6% de **matéria orgânica** e é composto por três partes distintas: **organismos vivos, resíduos frescos e resíduos bem decompostos**.

A **parte viva** da matéria orgânica do solo inclui uma ampla variedade de microrganismos (Figura 8), tais como bactérias, vírus, fungos, protozoários e algas, e representa em torno de 15% do total de matéria orgânica do solo. Ela inclui, ainda, as raízes das plantas, os insetos, minhocas e animais maiores, como toupeiras, marmotas e coelhos, que passam parte do seu tempo no solo.

Figura 8 – Principais organismos da parte viva da matéria orgânica do solo e a cadeia alimentar do solo.



Fonte: NRCS.

Os microrganismos, as minhocas e os insetos se alimentam (obtem energia e nutrição) dos resíduos de plantas e adubos e, durante o processo, eles misturam a matéria orgânica aos sólidos minerais do solo (Figura 9). Além disso, reciclam os nutrientes das plantas. Substâncias pegajosas da pele das minhocas e outras substâncias produzidas por fungos ligam (colam) as partículas entre si e ajudam a estabilizar os agregados do solo (que são aglomerados de partículas sólidas que constituem a estrutura do solo). As minhocas, alguns fungos e insetos também ajudam a estabilizar a estrutura do solo por intermédio da formação de canais, que permitem que a água se infiltre e, por sua vez, melhore a disponibilidade de água e a aeração do solo. As raízes das plantas também interagem de forma significativa com os vários microrganismos e animais que vivem no solo.

Figura 9 – Minhoca atuando na formação de agregados e de poros no solo.



Fonte: Casselmann, 2011.

Milhares de microrganismos, minhocas e insetos obtêm energia e nutrientes a partir da decomposição dos resíduos orgânicos do solo. Ao mesmo tempo, a maior parte da energia armazenada nos resíduos é utilizada pelos organismos para fazer novos compostos químicos e novas células. Como a energia fica armazenada dentro de resíduos orgânicos? As plantas verdes utilizam a energia da luz do sol para ligar os átomos de carbono em moléculas maiores. Este processo, conhecido como fotossíntese, é utilizado pelas plantas para armazenar a energia necessária para a respiração e para o crescimento.

Os **resíduos frescos** são formados por microrganismos, insetos e minhocas mortos recentemente, além de raízes de plantas velhas, resíduos de culturas e esterco adicionados há pouco tempo (Figura 10). Essa parte da matéria orgânica do solo é a fração ativa, ou a fração facilmente decomposta, considerada a principal fonte de alimento para vários organismos (microrganismos, insetos e minhocas) que vivem no solo. Como os materiais orgânicos são decompostos pelos organismos vivos, esses liberam muitos dos nutrientes necessários pelas plantas.

Figura 10 – Resíduos orgânicos frescos depositados sobre o solo.



Fonte: Semeato, 2014.

Os compostos químicos orgânicos produzidos durante a decomposição de resíduos frescos também ajudam a ligar as partículas do solo e a criar uma estrutura de melhor qualidade (Figura 11). As moléculas orgânicas libertadas diretamente das células dos resíduos frescos, tais como proteínas, aminoácidos, açúcares e amidos, também são consideradas parte da matéria orgânica fresca. No entanto, estas moléculas não duram muito tempo no solo, porque serão utilizadas como alimento pelos microrganismos.

Figura 11 – Estrutura do solo proveniente da ação dos compostos químicos orgânicos produzidos durante a decomposição de resíduos frescos.



Fonte: Semeato, 2014.

O **material orgânico bem decomposto** é chamado de *húmus* (Figura 12). O húmus não é um alimento para os organismos, mas seu tamanho reduzido e suas propriedades químicas o tornam uma parte importante do solo. O húmus retém alguns nutrientes essenciais, armazenando-os e liberando-os lentamente para as plantas. Ele também pode isolar determinados compostos químicos potencialmente prejudiciais e impedi-los de causar danos às plantas. Uma quantidade adequada de húmus no solo pode diminuir a drenagem e os problemas de compactação que ocorrem em solos muito argilosos, além de melhorar a retenção de água em solos arenosos, em função da melhora da agregação.

Figura 12 – Húmus acumulado no horizonte superficial de um Cambissolo.



Fonte: Giarola, 2000.

A decomposição normal da matéria orgânica do solo é um processo semelhante ao da queima de madeira em estufa. Quando a lenha atinge certa temperatura, o carbono da madeira se combina com o oxigênio do ar e forma dióxido de carbono (CO₂). Quando isso ocorre, a energia armazenada nos compostos químicos de carbono da madeira é libertada na forma de calor, em um processo denominado de oxidação. O mundo biológico, incluindo seres humanos, animais e microrganismos, também faz uso da energia das moléculas de carbono. Esse processo de conversão de açúcares, amidos e outros compostos em uma forma diretamente utilizável de energia também é um tipo de oxidação e costuma ser chamado de respiração. O oxigênio é utilizado e o dióxido de carbono e o calor são libertados durante o processo.

O carbono do solo é utilizado, muitas vezes, como sinônimo de matéria orgânica. Como o carbono é o principal bloco de construção de todas as moléculas orgânicas, a quantidade em um solo está fortemente relacionada com a quantidade total de toda a matéria orgânica (organismos vivos *mais* resíduos frescos *mais* resíduos bem decompostos).

Quando as pessoas falam de carbono do solo, em vez de matéria orgânica, elas estão se referindo, geralmente, ao carbono orgânico. A quantidade de matéria orgânica nos solos é cerca de duas vezes maior que a de carbono orgânico, ou melhor, a matéria orgânica do solo (MOS) possui 58% de carbono (C). Assim, uma das maneiras de estimar o teor de carbono orgânico total de uma amostra de solo, é multiplicar a quantidade de matéria orgânica por 1,724 (**MOS = C × 1,724**) (EMBRAPA, 2013).

2.2.2 A fase líquida

A fase líquida representa a chamada solução do solo e é definida como “uma solução de eletrólitos quase em equilíbrio, que ocorre no solo em condições de não saturação de umidade” (MALAVOLTA, 1976). Isso é assim porque a água do solo contém numerosos materiais orgânicos e inorgânicos, que foram dissolvidos da fase sólida.

A solução do solo é o meio para a maioria dos processos químicos e biológicos que ocorrem no solo e para o movimento de materiais. A água do solo transporta, em dissolução, nutrientes, sais solúveis, compostos orgânicos solúveis, contaminantes e materiais em suspensão, permitindo sua absorção pelas raízes. No entanto, essa solução está sujeita a alterações devido à evaporação, absorção de raiz, chuva, irrigação (ROSA; ROCHA, 2003).

Do ponto de vista da fertilidade física, o conteúdo de água do solo controla sua consistência, penetrabilidade pelas raízes, temperatura, etc. Assim, a gestão adequada do solo requer uma compreensão da dinâmica da água do solo. Além disso, a água condiciona a maioria dos processos de formação do solo.

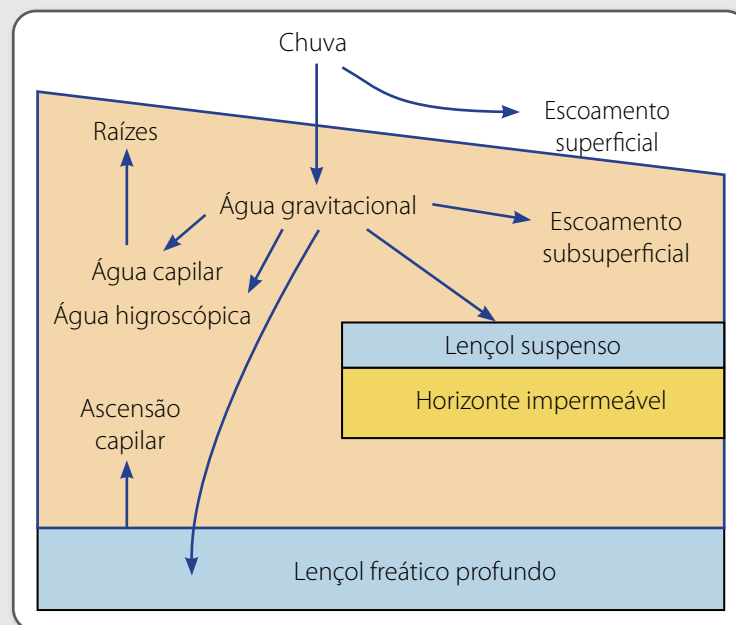
A água do solo pode vir de várias fontes:

- 1) Água de precipitação: constitui a maior parte da água fornecida, na maioria dos sistemas. Sua contribuição pode ser contínua ou concentrada em determinadas estações.
- 2) Água de precipitação de fontes subterrâneas.

- 3) Brumas, umidade atmosférica: é constituída por uma contribuição muito fraca, mas em alguns casos, é o único fornecimento de água durante o período seco.

Uma vez no solo, a água da chuva pode seguir diferentes caminhos (Figura 13):

Figura 13 – Esquema de distribuição da água da chuva no solo.



Fonte: Giarola, 2014.

O fluxo de matéria e energia e as importantes inter-relações entre os três grandes compartimentos (atmosfera, hidrosfera e litosfera) podem ser exemplificadas pela água da chuva (Figura 13). Esta, ao se formar na atmosfera, já constitui uma solução de várias substâncias extraídas do ar. Quando ocorre a chuva (precipitação pluvial), além das diversas substâncias trazidas da atmosfera, ao atravessar as camadas de solo, a água da chuva passa a transportar outras substâncias antes de chegar às raízes. No solo, a capacidade da água de dissolver diferentes substâncias é maximizada pela presença do gás carbônico, resultante da respiração das raízes e dos microrganismos. Além disso, as águas que se infiltram no solo preenchem os espaços existentes entre as partículas, de modo que a quantidade de água que percola pelo solo depende da permeabilidade do mesmo. Assim, quando esta é pequena, a maior parte da água escorre pela superfície em direção aos vales e rios (Figura 13), carregando consigo grandes quantidades de sedimentos e elementos nutritivos. Esse fenômeno natural é chamado de erosão.

Os diferentes caminhos que a água da chuva percorre no solo são descritos a seguir (Figura 13).

- 1) **Escoamento superficial:** flui ao longo e através das camadas superiores, paralelas à superfície do solo. O escoamento é formado após o início das chuvas sobre a superfície do solo, quando há certa inclinação do terreno. Para formar o escoamento, é necessário que a água precipitada em um dado intervalo de tempo exceda a quantidade que o solo pode absorver, quer por causa das suas características físicas, quer por já estar saturado com água.

2) **Água gravitacional:** é a água que penetra no solo pelo efeito da gravidade através dos macroporos e mesoporos (poros com mais de 10 µm de diâmetro). Circula na vertical ou obliquamente (se houver alguma inclinação). Quando a permeabilidade dos horizontes inferiores do solo for muito reduzida, a água gravitacional pode se acumular na forma de lençol suspenso, de caráter temporário.

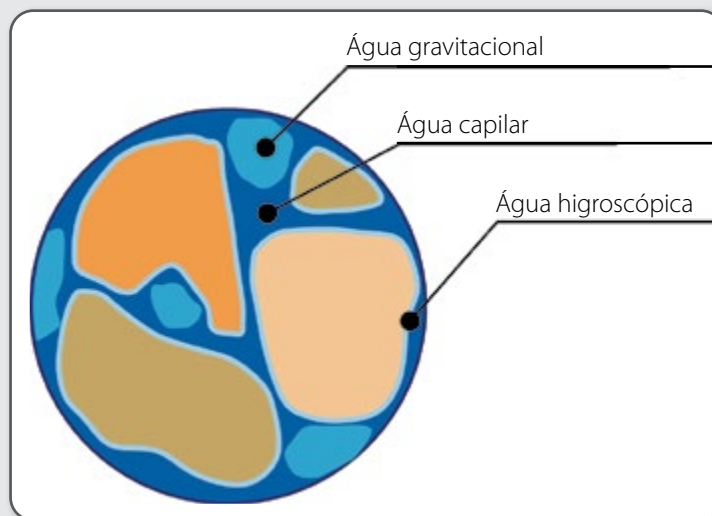
Existem dois tipos de água gravitacional:

- Água gravitacional de fluxo rápido: circula através dos poros de diâmetro superior a 50 µm de diâmetro, durante as primeiras horas após a chuva.
- Água gravitacional de fluxo lento: circula durante várias semanas após a chuva através dos poros de diâmetro entre 50 e 10 µm.

3) **Água retida:** é a água que ocupa os mesoporos e microporos do solo, onde as forças capilares ascendentes são mais fortes do que as da gravidade (Figura 14):

- Água capilar: é água retida nos mesoporos e que pode ser utilizada pelas plantas.
- Água higroscópica: é a água que fica retida nos microporos, ou seja, ocorre a formação de uma película muito fina que cobre a parede das partículas do solo. É tão fortemente retida que não pode ser absorvida pelas raízes das plantas.

Figura 14 – Água capilar e higroscópica do solo.



Fonte: Edafologia, 2014.

O quadro 4 resume dados compilados sobre a composição da solução do solo. Segundo Rosa & Rocha (2003), todos os nutrientes essenciais para as plantas cultivadas (macronutrientes), exceto o fósforo, geralmente estão presentes em concentrações da ordem de 10^{-3} a 10^{-4} mol L⁻¹. Em geral, o fósforo tem menor concentração, de 10^{-5} a 10^{-6} mol L⁻¹. Todos esses elementos químicos existem

em quantidades limitadas no solo. Nos ambientes naturais, tais elementos são continuamente reciclados. Isto é, à medida que são absorvidos pelas raízes, são novamente depositados na superfície por meio da queda contínua de folhas, frutos, ramos e outras partes vegetais. Ou, então, participam de um ciclo biogeoquímico maior, transferindo-se para outros compartimentos como a hidrosfera e/ou a atmosfera (ROSA; ROCHA, 2003). Por essa razão, a composição da solução do solo é muito variável. Em um determinado local o solo pode ter entre 10 e 30 kg de potássio por hectare. No entanto, em áreas cultivadas, uma colheita de cereais pode consumir até 100 kg por hectare (ha). Fósforo, por exemplo, pode estar presente no solo em uma concentração entre 0,5 e 10 kg por hectare, mas pode atingir o consumo de 20 kg por hectare.

Quadro 4 – Concentração típica da solução do solo¹.

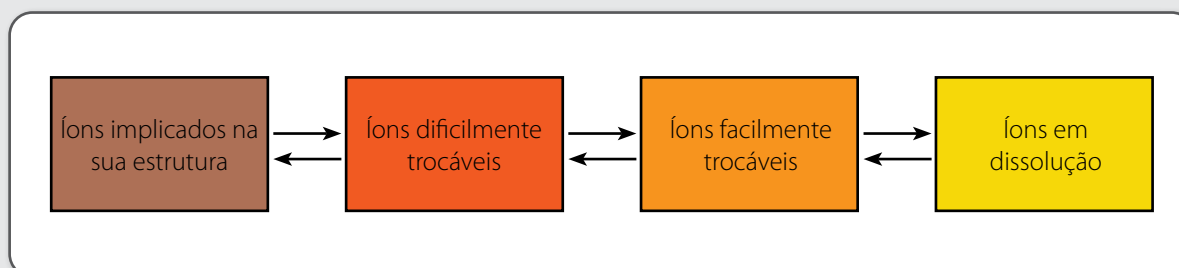
Elementos	Solos em geral 10 ⁻³ mol L ⁻¹	Solos ácidos
Nitrogênio (N)	0,16–55	12,1
Fósforo (P)	0,001–1	0,007
Potássio (K)	0,2–10	0,7
Magnésio (Mg)	0,7–100	1,9
Cálcio (Ca)	0,5–38	3,4
Enxofre (S)	0,1–150	0,5
Cloro (Cl)	0,2–230	1,1
Sódio (Na)	0,4–150	1,0

¹Nota: os elementos encontram-se no solo como componentes de substâncias ou espécies químicas, tais como nitratos, fosfatos, íons Mg²⁺, íons Ca²⁺, etc.

Fonte: Adaptado de Malavolta, 1976.

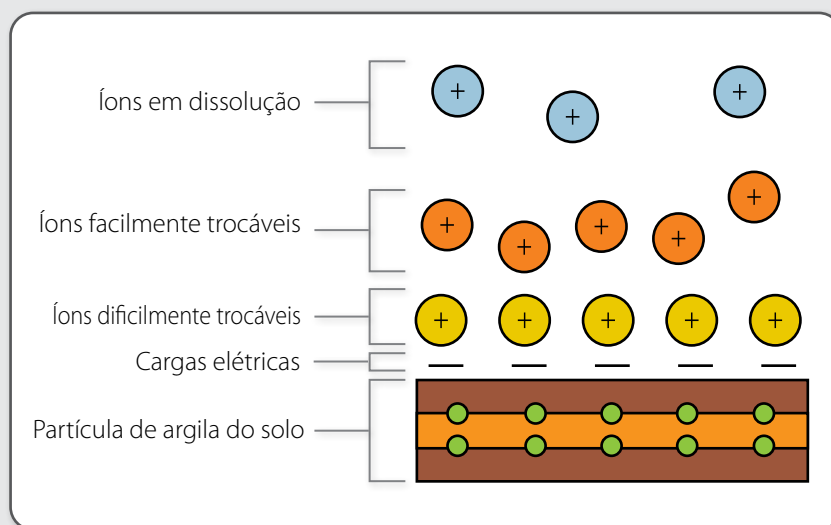
No solo, os íons não se encontram em um determinado compartimento, mas estão em uma troca contínua, dependendo das condições e da concentração de cada um na solução e na fase sólida. A Figura 15 mostra as distintas fases de troca de íons entre as fases sólida e líquida do solo. Em função de sua disponibilidade, os íons podem encontrar-se formando parte da capa difusa associada à superfície das argilas em dissolução (Figura 16).

Figura 15 – Fases de troca entre a fase sólida e a fase líquida do solo.



Fonte: Adaptado de Laidler, 1993.

Figura 16 – Disponibilidade de íons associado à argila não estrutural.



Fonte: adaptado de Laidler, 1993.

2.2.3 A fase gasosa

Outra caracterização da dinâmica de fluxos entre os compartimentos (litosfera, atmosfera e hidrosfera) é a constatação de que a fase gasosa do solo apresenta, qualitativamente, os mesmos componentes principais presentes no ar atmosférico (ROSA; ROCHA, 2003). Entretanto, do ponto de vista quantitativo, pode haver grandes diferenças, conforme se verifica no quadro 5. Ou seja, devido à respiração das raízes e dos microrganismos e à decomposição da matéria orgânica e de reações ocorridas no solo, há consumo de O_2 e liberação de CO_2 com constantes alterações nos fluxos entre os compartimentos e, conseqüentemente, a composição do ar do solo não é fixa. O ar circulante no interior do solo é a fonte de oxigênio para a respiração das células das raízes, bem como dos microrganismos e pequenos animais produtores de húmus. A maioria das plantas cultivadas requer solos bem arejados para atingir máximo desenvolvimento radicular (ROSA; ROCHA, 2003).

Quadro 5 – Composição média dos principais componentes presentes no ar atmosférico e no ar do solo.

Ar	Componentes (%)		
	O_2	CO_2	N_2
Atmosférico	21	0,03	72
Do solo	19	0,9	79

Fonte: Adaptado de Malavolta, 1976.

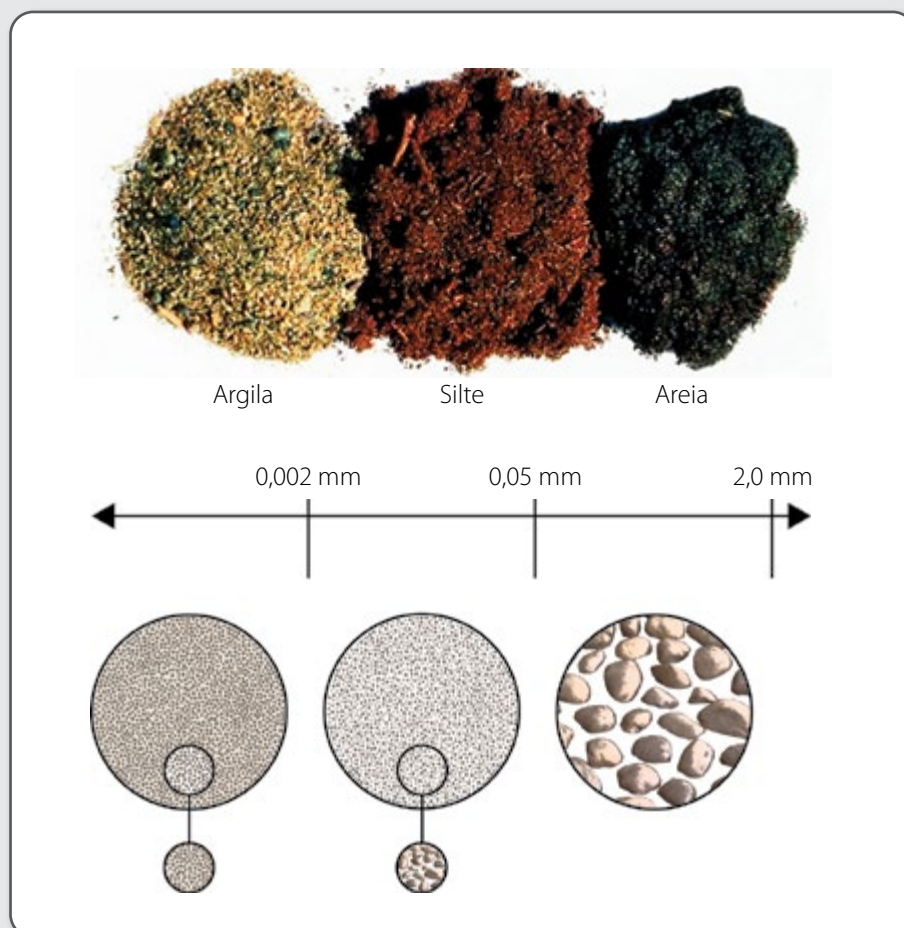
De modo geral, os sintomas de falta de oxigênio (amarelecimento das folhas, por exemplo) aparecem quando a concentração de O_2 nos espaços porosos está muito abaixo de 10% (ROSA; ROCHA, 2003).

3 ATRIBUTOS DO SOLO QUE INFLUENCIAM O DESENVOLVIMENTO DAS PLANTAS

3.1 TEXTURA DO SOLO

Textura é um termo empregado para designar a proporção relativa das classes de tamanho de partículas do solo com diâmetro inferior a 2 mm. A Sociedade Brasileira de Ciência do Solo define três classes de tamanho de partículas menores do que 2 mm, usadas para a definição das classes de textura dos solos: **areia**, **silte** e **argila** (Figura 17). Na textura do solo, não são consideradas as partículas que apresentam diâmetro maior do que 2 mm (matacões, calhaus, cascalhos), nem as partículas orgânicas, de modo que o total de partículas de um solo é igual ao somatório da proporção de areia, silte e argila, ou seja, um solo pode ter de 0 a 100% de areia, de silte e de argila.

Figura 17 – Classes de tamanho das partículas do solo com diâmetro inferior a 2 mm.



Fonte: Adaptado de Gardening ABC e Naperville Country Club Grounds, 2013.

3.1.1 Natureza das frações do solo

Os cientistas agrupam as partículas do solo de acordo com os diversos sistemas de classificação. No Brasil, utilizam-se basicamente dois sistemas: 1) Sistema Internacional ou de Atterberg; e 2) Sistema do Departamento de Agricultura dos EUA (Quadro 6).

Quadro 6 – Classes texturais das partículas dos solos de acordo com o Sistema do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) e Sistema Internacional de Atterberg (SI).

USDA	Diâmetro (μm)
Areia muito grossa	2000-1000
Areia grossa	1000-500
Areia média	500-250
Areia fina	250-100
Areia muito fina	100-50
Silte grosso	50-20
Silte fino	20-2
Argila	< 2
SI	
Areia grossa	2000-200
Areia fina	200-20
Silte	20-2
Argila	< 2

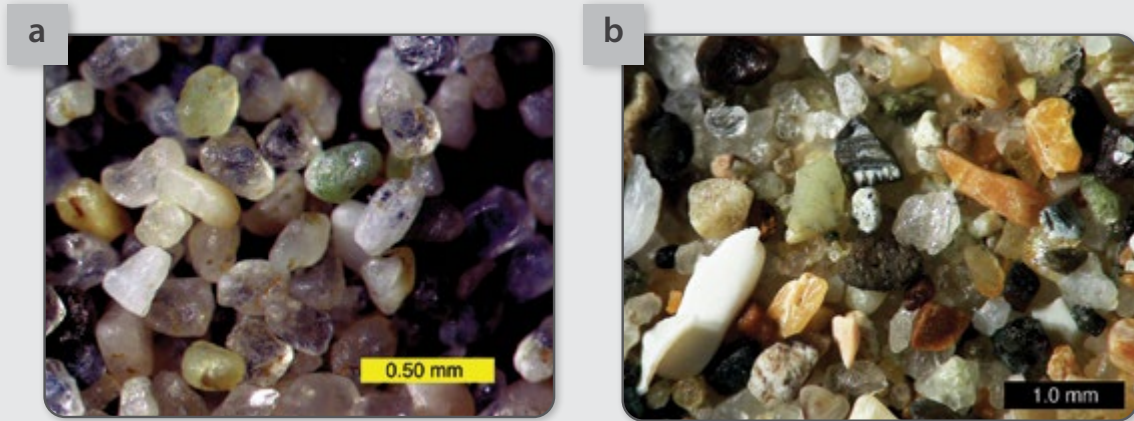
Fonte: Adaptado de Brady; Weil, 2008.

Os limites de tamanho empregados nos sistemas de classificação não são arbitrários, mas refletem em grandes mudanças no comportamento das partículas e nas propriedades físicas do solo por elas determinadas (Brady; Weil, 2008). Matações, cascalhos, seixos rolados e outros fragmentos grossos maiores que 2 mm de diâmetro podem afetar o comportamento de um solo, mas eles não são considerados como parte da fração terra fina (< 2mm de diâmetro), para a qual o termo textura do solo é aplicado.

▪ Fração areia

A fração areia é composta por partículas com diâmetro entre 0,05 mm e 2 mm. A areia dá a sensação de aspereza entre os dedos. As partículas são geralmente visíveis a olho nu e elas podem ser arredondadas ou angulares (Figuras 18A e 18B), dependendo do grau de intemperismo e abrasão que elas tenham sofrido. Partículas de areia grossa podem ser fragmentos de rocha contendo vários minerais (Figura 18B), mas a maioria dos grãos de areia é constituída por um só mineral, normalmente quartzo (SiO_2) (Figura 18a) ou outro silicato primário (feldspatos e micas). A dominância do quartzo significa que a areia separada, geralmente, contém poucos nutrientes para as plantas. O maior tamanho das partículas significa que os nutrientes presentes não deverão ser disponibilizados para absorção pelas plantas (Brady; Weil, 2008).

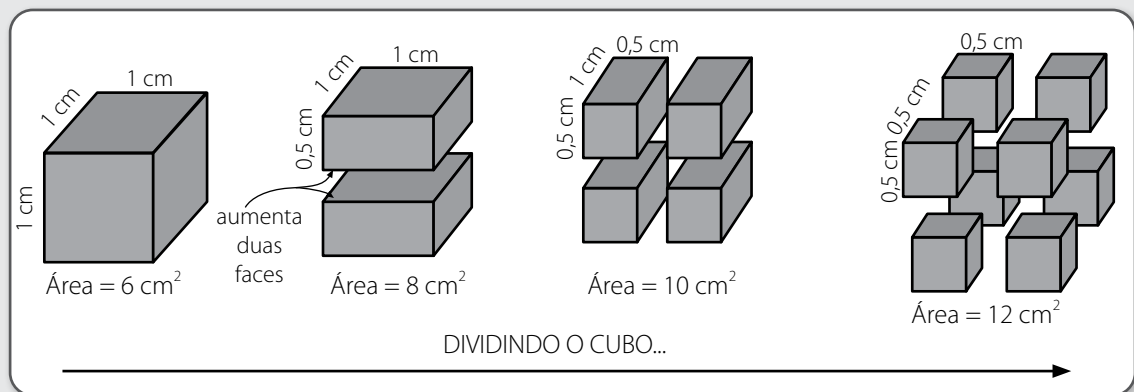
Figura 18 – Partículas da fração areia dos solos. Grãos arredondados (A); grãos angulosos (B).



Fonte: Wilson, 2010a e b.

O tamanho das partículas do solo influencia tanto a área superficial interna como o tamanho dos poros do solo. Quanto menor o tamanho das partículas, maior é a superfície interna do solo, ou seja, maior é a área superficial das partículas do solo (Brady; Weil, 2008). Essa relação entre diâmetro de partícula e área superficial específica (área superficial para uma dada massa de partículas) é ilustrada na Figura 19.

Figura 19 – Relação entre diâmetro de partícula e área superficial para uma dada massa de partículas.



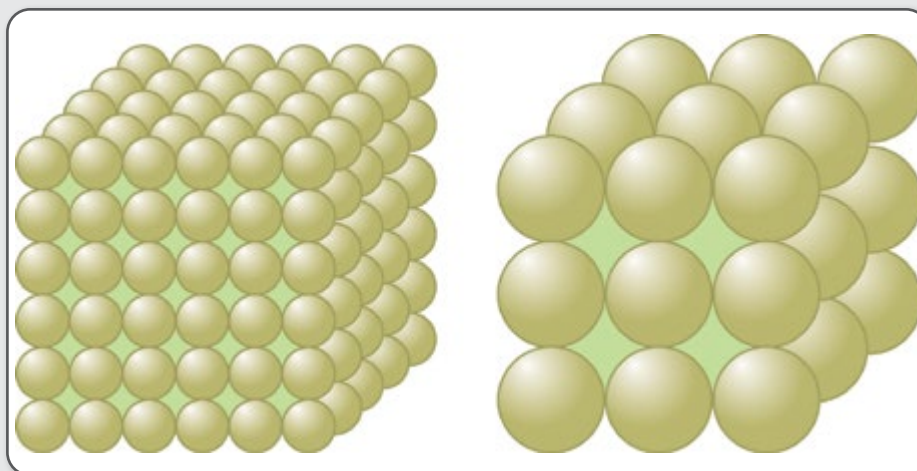
Fonte: Adaptado de Brady; Weil, 2008.

Devido ao maior tamanho, as partículas da fração areia têm pequena área superficial específica. Deste modo, também apresentam pequena capacidade de retenção de água ou nutrientes e não se mantêm unidas em uma massa coerente (Brady; Weil, 2008). A areia não tem capacidade de agregação, de modo a que suas partículas não se unem entre si e aparecem de maneira individualizada. Devido às propriedades descritas, muitos solos arenosos são aerados e soltos, mas também inférteis e propensos à seca.

Como as partículas de areia são relativamente grandes, os poros que se formam entre elas também possuem um diâmetro relativamente grande (Figura 20). Por outro lado, e de maneira

geral, partículas de tamanho menor diminuem o tamanho dos poros do solo (Figura 20). Os poros grandes que ocorrem nos solos arenosos não conseguem reter água contra a força da gravidade e, assim, drenam rapidamente e promovem entrada de ar no solo.

Figura 20 – O tamanho da partícula do solo afeta o tamanho dos poros. À esquerda, as partículas são pequenas e os poros entre elas também. À direita, as partículas e os poros entre elas são maiores.



Fonte: Adaptado de Brady; Weil, 2008.

▪ Fração silte

A fração silte é composta por partículas menores que 0,05 mm, mas maiores que 0,002 mm de diâmetro. Embora similares à fração areia na forma e composição mineral, as partículas individuais de silte são tão pequenas que não são visíveis a olho nu. Em vez de apresentar sensação de aspereza quando esfregadas entre os dedos, o silte se apresenta suave e sedoso ao toque, como o talco (Brady; Weil, 2008). Quando o silte é composto por minerais intemperizáveis, o tamanho relativamente menor (e grande área superficial) das partículas permite um intemperismo rápido o suficiente para liberar quantidades significativas de nutrientes para as plantas.

Os poros entre as partículas no material siltoso são bem menores (e muito mais numerosos) que os poros presentes entre as partículas de areia; deste modo, o silte retém água e permite uma menor taxa de drenagem. Entretanto, mesmo quando úmido, o silte por si só não exibe muita pegajosidade ou plasticidade (maleabilidade). A baixa plasticidade, coesão e capacidade de adsorção que algumas frações de silte apresentam é, em grande parte, devida à adesão de filmes de argila à superfície das partículas. Como a areia, o silte não tem capacidade de agregação. Em razão da sua baixa pegajosidade e plasticidade, solos com grandes quantidades de silte e areia fina podem ser altamente suscetíveis à erosão eólica e hídrica. Solos siltosos são facilmente carregados por fluxos de água, em um processo chamado “escoamento superficial” (Figura 13).

▪ Fração argila

A fração argila é composta por partículas menores que 0,002 mm. Elas possuem uma grande área superficial específica e uma grande capacidade de adsorção de água e de outras substâncias. Esta grande superfície de adsorção faz com que partículas de argila se mantenham unidas em uma

massa dura e coerente depois de seca. Quando úmida, a argila é pegajosa e pode ser facilmente moldada (apresenta alta plasticidade) (Brady; Weil, 2008).

Partículas de argila fina (< 0,001 mm de diâmetro) são tão pequenas que se comportam como coloides – se suspensas em água não se depositam prontamente. Diferentemente da maior parte das partículas de areia e silte, as partículas de argila tendem a ser moldadas em forma de pequenas lâminas ou placas planas. Os poros entre as partículas de argila são muito pequenos e irregulares, ocasionando lento movimento de água e ar no solo. Em solos argilosos, os poros entre as partículas são pequenos em tamanho (Figura 20), mas grande em número, permitindo que o solo retenha uma grande quantidade de água, embora uma boa parte desta possa não estar disponível para as plantas.

Cada mineral da fração argila atribui diferentes propriedades aos solos nos quais são predominantes. Por esta razão, propriedades do solo como contração e expansão, plasticidade, capacidade de retenção de água, resistência do solo e adsorção de elementos químicos (Quadro 8), são dependentes do tipo e da quantidade de argila presentes no solo.

Quadro 8 – Área superficial específica (ASE) e capacidade de troca de cátions (CTC) de alguns minerais da fração argila dos solos.

Argilomineral	ASE	CTC
	$\text{m}^2 \text{g}^{-1}$	$\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$
Caulinita	7–30	0–1
Óxidos	–	2–4
Micas	40–150	10–40
Vermiculita	500–800	100–150
Montmorilonita	600–800	80–150

Fonte: Adaptado de Fassbender, 1980.

3.1.2 Influência da textura sobre os atributos do solo

A textura do solo influencia muitas outras propriedades (Quadro 9) como resultado de cinco fenômenos fundamentais de superfície:

1. Além das pequenas quantidades de água retida nos pequenos poros do solo, a água também é retida como pequenos filmes aderidos à superfície das partículas do solo. Quanto maior a área superficial, maior a capacidade de retenção de água.
2. Gases e substâncias químicas são atraídos e adsorvidos pela superfície das partículas minerais. Quanto maior a área superficial, maior a capacidade de retenção de nutrientes e outras substâncias químicas do solo.
3. O processo de intemperismo ocorre na superfície das partículas minerais, liberando elementos constituintes na solução do solo. Quanto maior a área superficial, maior a taxa de liberação de nutrientes para as plantas por meio de minerais intemperizáveis.
4. As superfícies das partículas minerais muitas vezes apresentam tanto cargas negativas como algumas cargas eletromagnéticas positivas, então estas superfícies das partículas e filmes de água entre eles tendem a se atrair. Quanto maior a área superficial, maior a tendência das partículas manterem-se unidas em uma massa coesa ou como pequenos agregados.

5. Os microrganismos tendem a se desenvolver e colonizar as superfícies das partículas. Por essas e outras razões, reações microbiológicas nos solos são altamente afetadas pela área superficial específica.

Quadro 9 – Influência das frações areia, silte e argila em algumas propriedades e comportamento dos solos¹.

Propriedade/comportamento do solo	Areia	Silte	Argila
Capacidade de retenção de água	Baixa	Média a alta	Alta
Aeração	Boa	Média	Ruim
Taxa de drenagem	Alta	Lenta a média	Muito lenta
Teor de matéria orgânica	Baixo	Médio a alto	Alto a médio
Decomposição da matéria orgânica	Rápida	Média	Lenta
Suscetibilidade à compactação	Baixa	Média	Alta
Suscetibilidade à erosão eólica	Moderada	Alta	Baixa
Suscetibilidade à erosão hídrica	Baixa (menos areia fina)	Alta	Baixa, se agregado; Alta, não agregado
Potencial de expansão e contração	Muito baixo	Baixo	Moderado a muito alto
Adequabilidade para construção de represas e aterros	Ruim	Ruim	Boa
Capacidade de cultivo após a chuva	Boa	Média	Ruim
Potencial de lixiviação de poluentes	Alto	Médio	Baixo (a não ser os fendilhados)
Capacidade de armazenamento de nutrientes	Baixa	Média a alta	Alta
Resistência a mudanças do pH	Baixa	Média	Alta

¹. Exceções a essas generalizações ocorrem, como resultado da estrutura do solo e mineralogia da fração argila.

Fonte: Adaptado de Brady; Weil, 2008.

3.1.3 Classificação textural

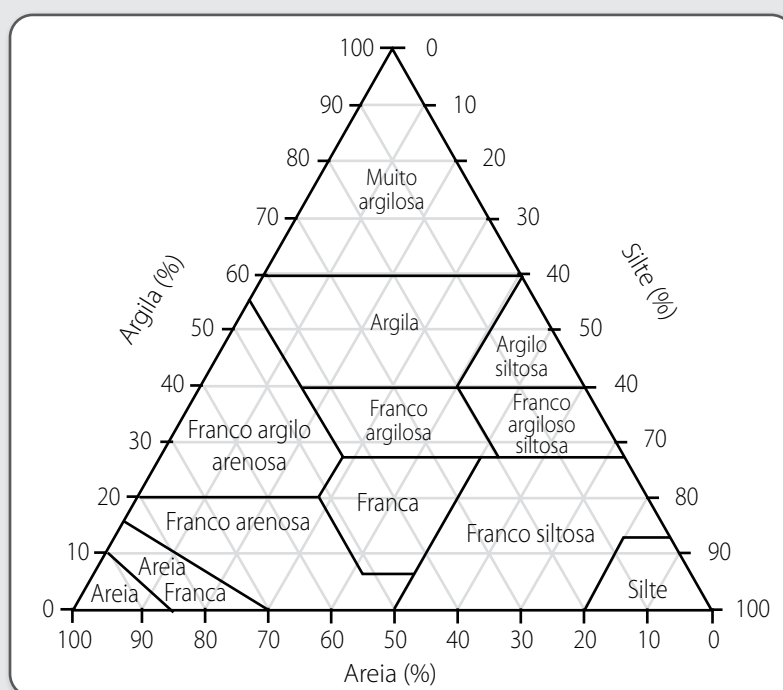
Do ponto de vista prático, os solos podem ser agrupados em três tipos diferentes de acordo com a classe textural predominante: 1) **solos argilosos** (pesados); 2) **solos francos** (médios); e, 3) **solos arenosos** (leves). Dentre esses três grupos principais de solos (argilosos, francos e arenosos), os nomes de classes texturais específicas fornecem uma ideia mais precisa da distribuição de tamanho de partículas e da natureza geral das propriedades físicas do solo. As 14 classes texturais encontradas na Figura 21B apresentam uma sequência gradual desde partículas de areia, as quais possuem textura grossa, às partículas de argila, que possuem textura muito fina. Na classe arenosa e areia franca, ocorre predomínio das propriedades da areia, pois a fração areia compreende pelo menos 70% do material em peso e menos que 15% do material é argila. No entanto, a maioria dos solos está como algum tipo de **franco**.

O conceito central **franco(a)** pode ser definido como uma mistura de areia, silte, e partículas de argila que exibe as *propriedades* dessas frações em proporções iguais. Essa definição não significa que as três frações estão presentes em quantidades iguais (por isso, a classe **franca** não está exatamente no meio do triângulo na Figura 21). Essa anomalia existe porque uma porcentagem relativamente pequena de argila é suficiente para atribuir, ao solo, propriedades referentes a esta fração, considerando que pequenas quantidades de areia e silte possuem menor influência sobre

o comportamento do solo. Um solo franco em que a areia é dominante é classificado como um franco arenoso. Do mesmo modo, alguns solos são classificados como franco-siltosos, franco-argilo-siltosos, franco-argilo-arenosos e franco-argilosos. Na Figura 21 é possível notar que um solo franco pode ter desde pouca até 26% de argila, mas para ser qualificado como franco arenoso ou franco siltoso, o solo precisa ter no mínimo 45% de areia ou 50% de silte, respectivamente.

As principais classes texturais do solo são definidas pelas porcentagens de areia, silte e argila de acordo com as linhas mais escuras mostradas no triângulo textural (Figura 21). Se estas porcentagens forem determinadas para uma amostra de solo por análise do tamanho de partícula, então o triângulo de classe textural poderá ser utilizado para determinar o nome da classe textural aplicada a essa amostra de solo.

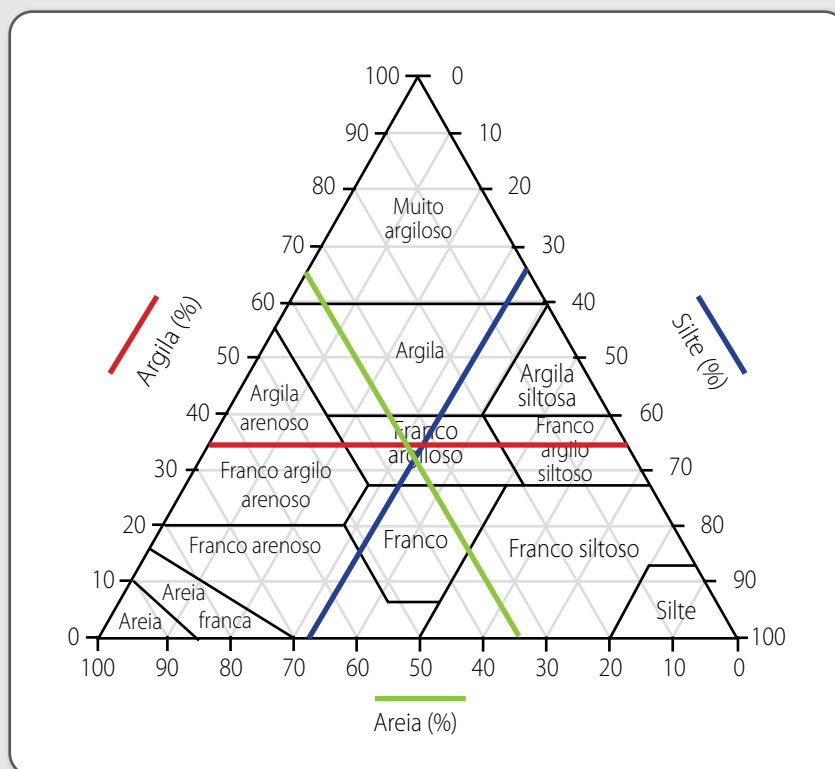
Figura 21 – Triângulo textural indicando as classes texturais específicas.



Fonte: Embrapa, 2013.

Para usar o triângulo textural, primeiro deverá ser localizada a adequada porcentagem de argila ao lado esquerdo do triângulo; então, desenhe uma linha a partir do local por todo o gráfico indo paralela à base do triângulo (Figura 22). Depois, encontre a porcentagem de areia na base do triângulo, e então desenhe uma linha paralela ao lado do triângulo relativo à “porcentagem de silte”. As pequenas setas (Figura 21) indicam a direção proposta no qual as linhas deverão ser desenhadas. O nome do compartimento em que estas duas linhas se interceptam indica a classe textural da amostra de solo (Figura 22). Somente a porcentagem de duas das três frações é necessária, pois, a porcentagem de areia, silte e argila somam 100%, e a terceira porcentagem pode ser facilmente calculada se somente duas são conhecidas. Se as três porcentagens são utilizadas, as três linhas se interceptaram no mesmo ponto.

Figura 22 – Exemplo da determinação da classe textural de um solo por meio do triângulo textural.



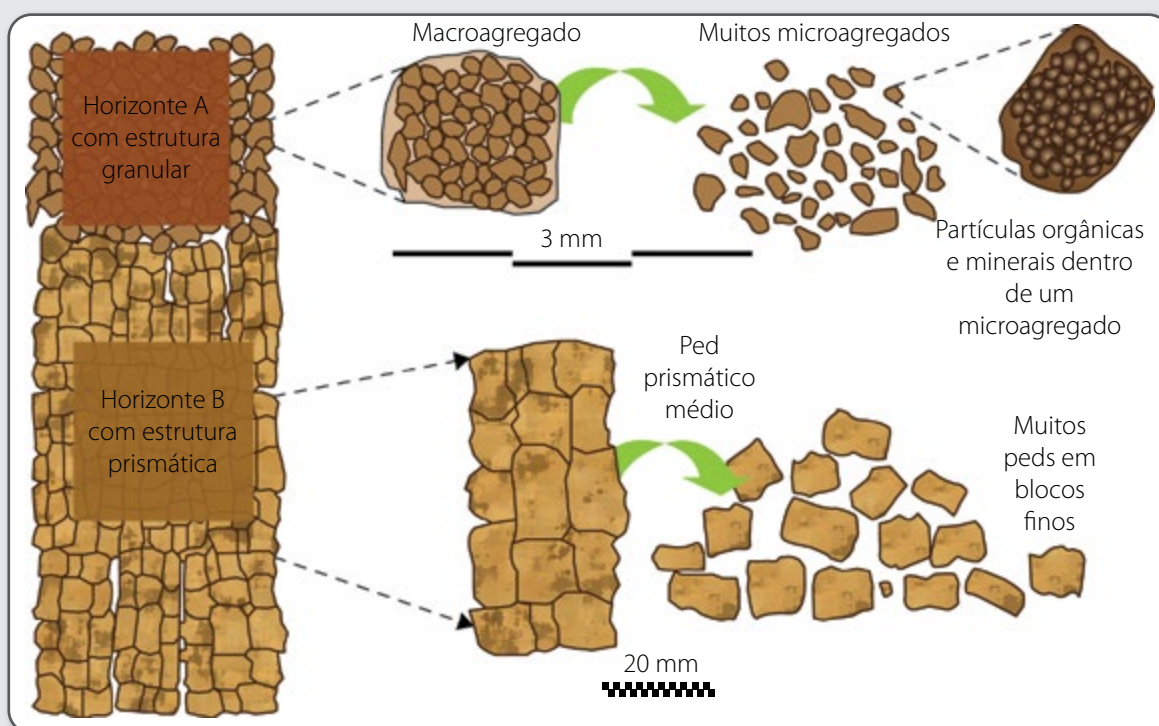
Fonte: Adaptado de Embrapa, 2013.

3.2 ESTRUTURA DO SOLO

O termo estrutura refere-se ao arranjo de areia, silte, argila e partículas orgânicas no solo (Brady; Weil, 2008). As partículas tornam-se agregadas devido a diversas forças e em diferentes escalas formando unidades estruturais distintas chamadas **peds** ou **agregados**. Quando uma massa de solo é escavada e suavemente desmembrada, ela tende a quebrar em peds ao longo das linhas naturais de fraqueza. Essas linhas exibem baixa resistência tênsil, porque as partículas dentro de um ped ou agregado são mais fortemente atraídas umas às outras do que por partículas do solo circunvizinho. Embora *agregado* e *ped* possam ser usados como sinônimos, o termo *ped* é mais comumente usado para descrever a estrutura em larga escala evidente quando se observa perfis de solo envolvendo unidades estruturais que variam em tamanho desde poucos milímetros a cerca de um metro. Nessa escala, a atração das partículas do solo uma pelas outras nos padrões que definem as unidades estruturais é influenciada, principalmente, por processos físicos, tais como congelamento-descongelamento, molhamento-secamento, expansão-contração, a penetração e expansão das raízes das plantas, a construção de galerias dos animais de solo, e as atividades de pessoas e máquinas. Os peds estruturais não devem ser confundidos com torrões de terra – pedaços coesos de solo que podem se formar artificialmente quando o solo molhado é cultivado ou escavado (Brady; Weil, 2008).

A maioria dos grandes pedos é composta por, e podem ser divididos em, pedos menores ou agregados (Figura 23). Cada grande unidade estrutural observada em um perfil de solo contém muitas unidades menores. O exemplo da Figura 23 mostra como os grandes agregados prismáticos típicos de horizontes B dividem-se em agregados menores (e assim por diante). O exemplo também ilustra como microagregados menores que 0,25 mm de diâmetro estão contidos em macroagregados granulares de cerca de 1 mm de diâmetro, típicos de horizontes A. Muitas vezes, os microagregados se formam ao redor e obstruem as pequenas partículas de matéria orgânica inicialmente presas nos macroagregados. Observe as duas escalas diferentes para as estruturas prismáticas e granulares.

Figura 23 – A organização hierárquica da estrutura do solo.



Fonte: Adaptado de Brady; Weil, 2008.

A rede de **poros** dentro e entre os agregados constituem um aspecto chave da estrutura do solo. A rede de poros tem grande influência no movimento de ar e água, no crescimento de raízes de plantas, e na atividade dos organismos do solo, incluindo o acúmulo e decomposição da matéria orgânica. Práticas como extração de madeira, pastagem, plantio, o tráfego, e adubação impactam amplamente os solos por meio de seus efeitos na estrutura do solo, principalmente nos horizontes superficiais.

3.2.1 Tipos de estrutura do solo

Muitos tipos e formas de agregados ocorrem em solos, frequentemente dentro de diferentes horizontes de um perfil de solo particular. Alguns solos podem exibir uma condição estrutural

em **grãos únicos**, na qual partículas não estão agregadas (Figura 24a). A areia solta em dunas ou acúmulo de poeira solta como sedimentos recentemente depositados são exemplos dessa condição estrutural em grão único. No extremo oposto, alguns solos (como em certos sedimentos argilosos) ocorrem como grandes massas de material coeso (Figura 25) e são descritos como mostrando uma condição estrutural **maciça**. No entanto, a maioria dos solos apresenta algum tipo de agregação e são compostos por agregados (Figura 24b) que podem ser caracterizados por sua forma (ou tipo), tamanho, e desenvolvimento (ou grau) (Brady; Weil, 2008).

Figura 24 – Partículas do solo com ausência de estrutura (A) e com estrutura ou agregadas (B).



Fonte: Adaptado de Brady; Weil, 2008.

Figura 25 – Solo com estrutura do tipo maciça (coesa) ou ausência de estrutura.



Fonte: Giarola, 2003.

As quatro principais formas de agregado do solo são: esferoidal, laminar, prismática e em blocos, conforme descrito abaixo.

- **Esferoidal:** a estrutura **granular** consiste de **agregados** esferoidais que podem ser separados uns dos outros em um arranjo ligeiramente comprimido (Figura 26). Eles normalmente variam de menos de 1 até maiores que 10 milímetros de diâmetro. Em referência a esse tipo de estrutura, o termo *agregado* é mais comum do que *ped*. A estrutura granular caracteriza muitas superfícies de solos (normalmente horizontes A), particularmente aqueles ricos em matéria orgânica. Conseqüentemente, esse é o principal tipo de estrutura de solo afetado pelo manejo. Agregados granulares são particularmente visíveis em solos de pastagens e em solos que têm atividade de minhocas.

Figura 26 – Estrutura do solo tipo esferoidal.



Fonte: Brady; Weil, 2008.

- **Laminar:** estrutura laminada, caracterizada por agregados ou placas horizontais relativamente finas, que pode ser encontrada tanto nos horizontes superficiais como nos subsuperficiais. Na maioria dos casos, as placas têm se desenvolvido como um resultado dos processos de formação do solo. Entretanto, ao contrário de outros tipos de estrutura, a estrutura laminar também pode ser herdada do material de origem do solo, especialmente aqueles depositados por água ou gelo. Em alguns casos, a compactação em solos argilosos por máquinas pesadas, pode formar a estrutura laminar (Figura 27).

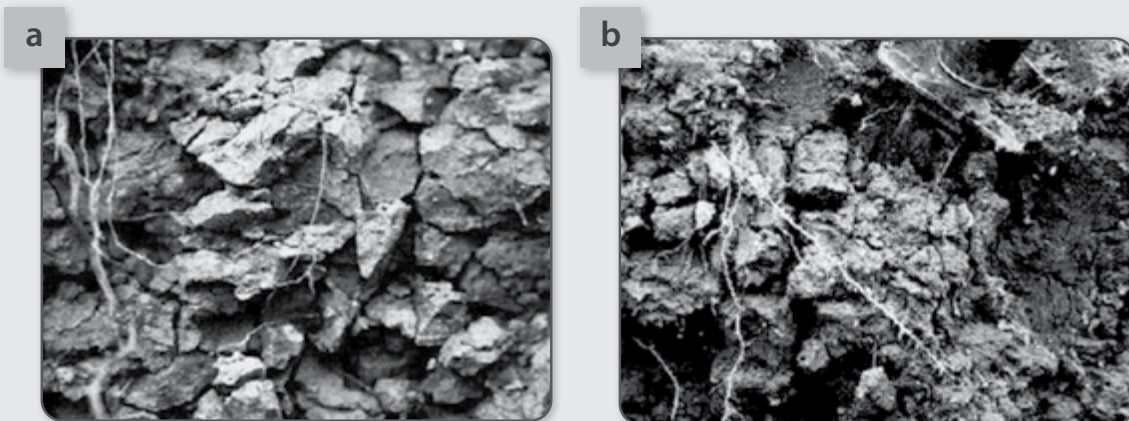
Figura 27 – Estrutura do solo tipo laminar.



Fonte: Brady; Weil, 2008.

- **Blocos:** agregados em blocos são irregulares e praticamente cúbicos, e variam no intervalo de 5 a 50 mm de comprimento. Os blocos individuais não são moldados individualmente, mas são moldados pelas formas dos blocos adjacentes. Quando as bordas dos blocos são ângulos agudos e as faces distintas retangulares, o subtipo é chamado **bloco angular** (Figura 28a). Quando alguns arredondamentos têm ocorrido, os agregados são referidos como **blocos subangulares** (Figura 28b). Esses tipos são normalmente encontrados no horizonte B, onde eles promovem drenagem, aeração e penetração radicular.

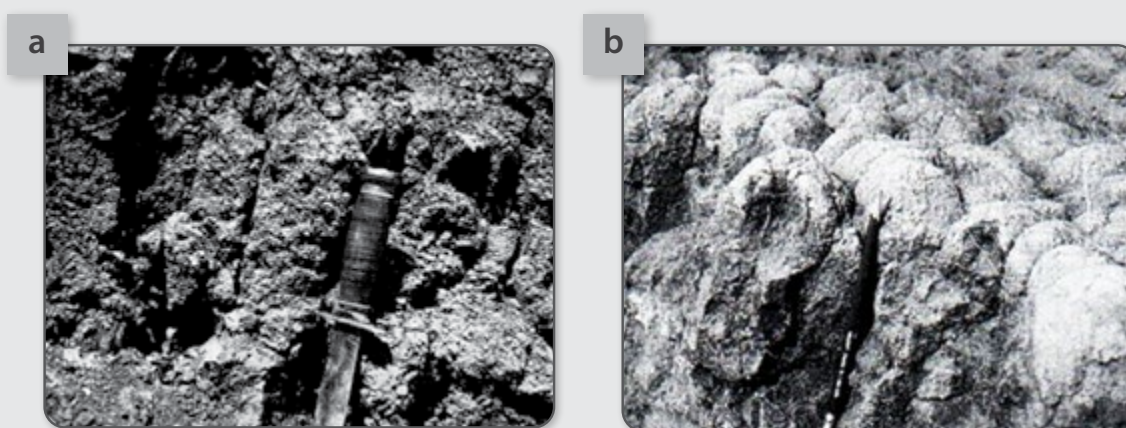
Figura 28 – Estrutura do solo tipo blocos angulares (A) e subangulares (B).



Fonte: Brady; Weil, 2008.

- **Prismática:** as estruturas colunar e prismática são caracterizadas por agregados semelhantes a prismas ou pilares orientados verticalmente que variam em altura entre os diferentes solos e podem ter um diâmetro de 150 mm ou mais. Estrutura colunar (Figura 29a), a qual possui pilares com partes superiores distintas e arredondadas, é encontrada principalmente em subsolos ricos em sódio. Quando as partes superiores dos prismas são relativamente angulares e horizontalmente planas, a estrutura é designada como prismática (Figura 29b). Ambas estruturas são normalmente associadas com tipos de argilas expansivas. A estrutura prismática ocorre comumente em horizontes subsuperficiais de regiões áridas e semiáridas e, quando bem desenvolvidas, fornecem uma característica muito marcante ao perfil do solo. Em regiões úmidas, a estrutura prismática às vezes ocorre em solos maldrenados e em solos cimentados.

Figura 29 – Estrutura do solo tipo prismática (A) e colunar (B).



Fonte: Brady; Weil, 2008.

3.2.2 Fatores que afetam a formação de agregados

- **Cátions**

Os cátions alteram a espessura da dupla camada iônica causando floculação ou dispersão. Exemplo: Ca, Mg, óxido de ferro e alumínio

- **Matéria orgânica**

A matéria orgânica atua na agregação do solo como um agente cimentante. Devido à matéria orgânica ser suscetível à decomposição pelos microrganismos, a mesma deve ser repostada continuamente para que se mantenha a estabilidade dos agregados ao longo do tempo (HILLEL, 1982).

- **Sistemas de cultivo e sistema radicular**

A influência do sistema de cultivo na agregação é função do sistema radicular, densidade e continuidade da cobertura, modo e frequência do cultivo e tráfego.

As raízes exercem pressões que comprimem os agregados separando dos agregados adjacentes. A absorção de água pelas raízes causa desidratação diferencial, contração e abertura de numerosas trincas pequenas. Os produtos de exsudação das raízes aliados à morte contínua das raízes, particularmente do pelos radiculares, promovem a atividade biológica, a qual resulta na produção de cimentos húmicos.

As condições de umidade na hora do cultivo têm grande influência na estabilidade dos agregados. O preparo do solo com alta umidade pode causar compactação, enquanto que o preparo do solo quando seco pode causar pulverização. Portanto, para se preservar os agregados, aconselha-se que o preparo do solo seja feito na zona de friabilidade do solo.

▪ **Microrganismos**

Os microrganismos (bactérias e fungos) do solo cimentam os agregados através de produtos excretados. Dentre os produtos excretados pode-se citar: polissacarídeos, hemiceluloses ou uronides, etc.

3.2.3 A estrutura adequada para o desenvolvimento das plantas

Agronomicamente, solos bem estruturados se esboroam facilmente e espontaneamente, quando secos. Assim, quando relativamente secos podem ser facilmente cultivados e, quando molhados, não aderem às ferramentas. A superfície de solos agregados facilita a emergência de plântulas e a infiltração de água no solo. Uma boa agregação (Figura 30a) evita a impermeabilização do solo e posterior formação de crostas superficiais.

Em solos agregados, a melhor infiltração de água reduz a erosão e o escoamento da água superficial, aumentando a água disponível para as plantas. Além disso, os solos agregados permitem um bom fluxo de ar, água e nutrientes, promovem o desenvolvimento e a atividade dos microrganismos aeróbios, fauna do solo e a penetração de raízes. Um solo bem estruturado é mais resistente à erosão do que as partículas soltas de areia, silte e argila e matéria orgânica.

De modo sintético, **um solo bem estruturado apresenta:**

- poros adequados para a entrada de ar e água no solo;
- porosidade adequada para que a água se movimente através do solo, sendo disponível para as culturas, assim como permita uma boa drenagem do solo;
- porosidade adequada para o crescimento das culturas após a germinação das sementes, permitindo que as raízes explorem um maior volume de solo em busca de ar, água e nutrientes e;
- resistência do solo **à erosão pela alta agregação.**

Figura 30 – Camadas superficiais de solos com qualidade da estrutura boa (A) e ruim (B) e (C).



Fonte: Giarola, 2012.

A perda das condições adequadas da estrutura do solo define a degradação da mesma (Figuras 30B e 30C) e são causadas principalmente por:

- preparo intensivo dos solos e queima dos resíduos;
- tráfego intenso de máquinas sobre solos com umidade inadequada;
- impacto direto das gotas de chuva sobre a superfície do solo;
- dispersão química dos coloides dos solos;
- inaptidão agrícola dos solos.

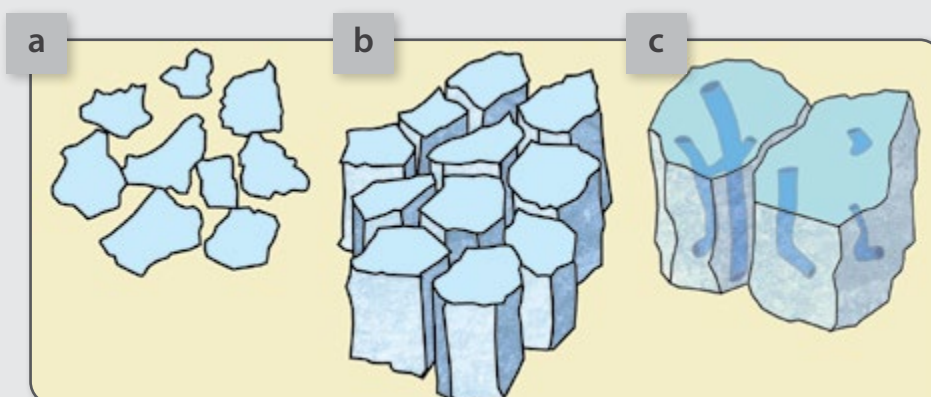
3.3 POROSIDADE DO SOLO

O espaço do solo não ocupado por sólidos e ocupado pela água e ar compõem o espaço poroso, definido como a proporção entre o volume de poros e o volume total de um solo. É de grande importância para o crescimento de raízes e movimento de ar, água e solutos no solo. Para um solo "ideal" de textura média, bem granulado e com a superfície do solo em boas condições para o crescimento de plantas, aproximadamente 50% do volume consistiria de espaço poroso, e este espaço poroso seria de cerca de metade com ar e metade com água. Na realidade, a porosidade total varia muito entre os solos. Alguns solos apresentam em subsolos compactados valores muito baixos, como 12%; outros apresentam valores muito altos, com mais de 60% em horizontes superficiais bem agregados e com alto teor de matéria orgânica. O manejo do solo pode exercer uma influência decisiva no espaço poroso dos solos. Dados de uma grande variedade de solos mostram que o cultivo tende a diminuir o espaço poroso do solo comparado a solos não cultivados.

3.3.1 Tamanho e forma dos poros

Os poros no solo possuem ampla variedade de tamanhos e formas. O tamanho, forma e interconexão dos poros do solo, em vez de seu volume total, são os fatores mais importantes na determinação da drenagem do solo, aeração e outros processos do solo. A Figura 31 ilustra a variabilidade de tamanhos e formas dos poros do solo, que variam desde os microporos dentro dos agregados, onde o movimento de ar e água é restrito, até os macroporos maiores, nos quais o ar e a água se movimentam livremente.

Figura 31 – Diferentes tipos de poros do solo.



Fonte: Brady; Weil, 2008.

Muitos poros do solo ocorrem como espaços do arranjo, deixados entre as partículas primárias do solo. O tamanho e forma desses espaços são altamente dependentes do tamanho e forma das partículas primárias de areia, silte e argila e de seu arranjo (Figura 31a). Em solos com agregados estruturais, os poros são encontrados entre os agregados formando poros entre os agregados (Figura 31b). Estes poros podem ser planos, como fissuras entre unidades estruturais prismáticas, ou podem ser irregulares, como aqueles presentes entre agregados granulares. Bioporos são formados por organismos como minhocas, insetos e raízes de plantas (Figura 31c). A maioria deles são canais longos e ramificados, mas alguns são apenas cavidades arredondadas deixadas por ninhos de insetos e afins.

Libardi (2000) refere-se ao tamanho do poro como o diâmetro da maior esfera inscrita no interior do espaço ocupado pelo poro, e é por este motivo que os poros do solo são classificados em termos de diâmetro de poro. Segundo Koorevaar et al. (1983), os poros do solo são classificados, empiricamente, em três grupos:

- a) **Macroporos** – poros com diâmetro maior do que 100 μm . São responsáveis pela aeração e escoamento da água no solo (Quadro 10). Os macroporos permitem rápida movimentação de ar e drenagem de água. Eles também são grandes o suficiente para acomodar as raízes das plantas e ampla gama de pequenos organismos que habitam o solo. Os macroporos podem ocorrer como espaços entre partículas individuais de areia em solos de textura grossa. Desse modo, apesar dos solos arenosos possuírem relativamente baixa porosidade total, o movimento de ar e água através desse tipo de solo é muito rápido pela predominância de macroporos.

Macroporos criados por raízes, minhocas, e outros organismos constituem um tipo muito importante de poros chamados **bioporos**. Estes apresentam, normalmente, formato tubular e podem ser contínuos, atingindo um metro de comprimento ou mais (Figura 31c). Em alguns solos argilosos, os bioporos são a forma predominante de macroporos, facilitando grandemente o desenvolvimento radicular das plantas. Vegetações perenes, como árvores de florestas e certas culturas forrageiras, são particularmente eficientes na criação de canais que servem como condutos para raízes, após a morte e declínio das raízes que originalmente os criaram.

Em solos bem estruturados, os macroporos são geralmente encontrados entre agregados. Esses **poros entre agregados** podem ocorrer como espaços entre os grânulos soltos ou como fissuras planas (Figuras 28a e 31b e) entre blocos apertados e agregados prismáticos.

- b) **Mesoporos** – poros com diâmetro entre 30 e 100 μm . São responsáveis pela distribuição da água no espaço poroso e retém a água que as plantas podem utilizar (água disponível) (Quadro 10).

- c) **Microporos** – poros com diâmetro menor do que 30 μm . Também são responsáveis pela retenção da água no solo (Quadro 10). Esses poros são chamados de poros capilares. Ao contrário dos macroporos, os microporos geralmente se encontram preenchidos com água, em condições de campo. Mesmo quando não preenchidos por água, eles são muito pequenos para permitir grande movimento de ar. O movimento de água nos microporos é lento, e a maior parte da água retida nestes poros não está disponível para as plantas. Solos de textura fina, especialmente aqueles sem uma estrutura granular estável, podem ter predomínio de microporos, permitindo assim um movimento relativamente lento de gases e água, apesar do grande volume relativo de espaço poroso. A aeração, principalmente no subsolo, pode ser inadequada para um bom desenvolvimento radicular e atividade microbológica desejável. Enquanto os microporos de maior tamanho acomodam pelos radiculares e microrganismos, os de menor tamanho (também chamados de ultramicroporos e criptoporos) são tão pequenos que seus raios são medidos em nanômetros (10^{-9} metros), dando origem ao termo nanoporos. Tais poros são muito pequenos para permitir a entrada até das menores bactérias e de algumas enzimas, estimulantes de senescência, produzidas por estas. Entretanto, podem servir como abrigos para alguns compostos orgânicos (tanto naturais como poluentes), protegendo-os da degradação por longos períodos, até séculos.

Quadro 10 – Classificação e propriedade dos poros em função do seu tamanho.

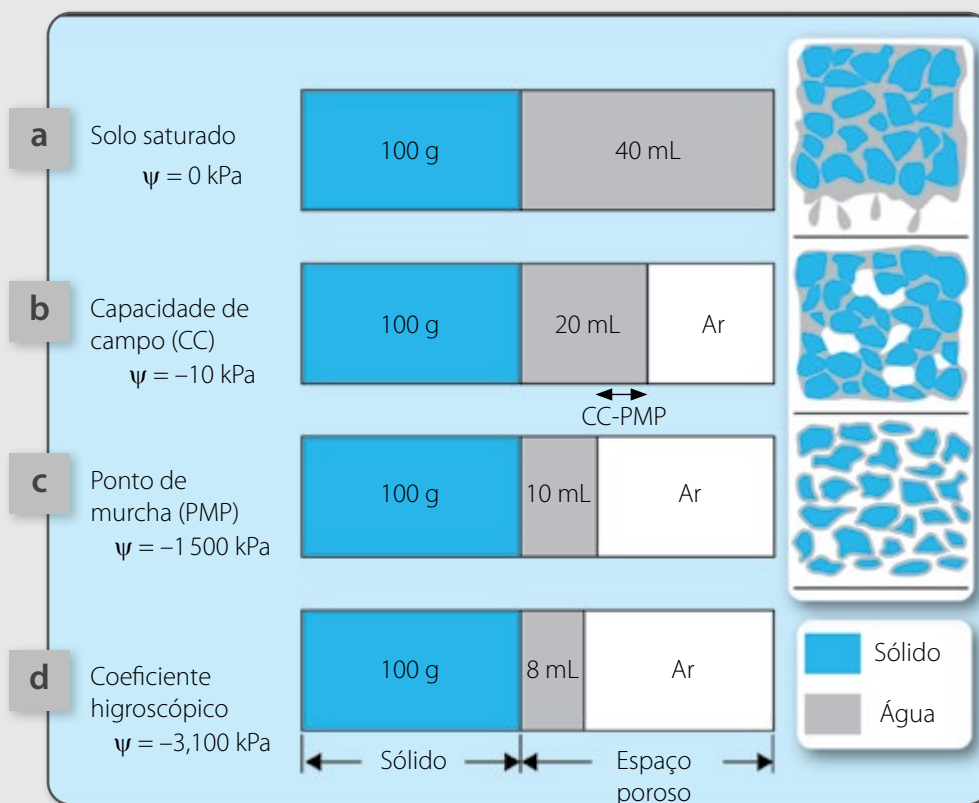
Diâmetro do poro	Tipo de Poro	Propriedades
> 100 μm	Macroporos	Permitem o movimento livre dos fluidos. A água da chuva se perde facilmente por gravidade e não pode ser aproveitada pelas plantas.
100 – 30 μm	Mesoporos	Retém a água que as plantas podem utilizar (água disponível).
< 30 μm	Microporos	Retém a água com muita força, de maneira que não pode ser utilizada pelas plantas.

Fonte: Adaptado de Libardi, 2000.

3.4 ÁGUA E AERAÇÃO DO SOLO

O espaço poroso do solo pode ser preenchido por água ou ar, e a quantidade relativa destes elementos varia com o conteúdo de água no solo (Figura 32). Quando todos os poros estão cheios de água, o solo está saturado (Figura 32a) e a troca de gases do solo com os gases atmosféricos é muito lenta. Nessas condições, o dióxido de carbono (CO_2) produzido pela respiração das raízes e dos organismos do solo não pode sair do solo e o oxigênio atmosférico não pode entrar, levando a condições anaeróbias (sem oxigênio) indesejáveis. No outro extremo, um solo com pouca água pode apresentar boas trocas gasosas, mas ser incapaz de fornecer água suficiente para as plantas e organismos do solo (Figuras 32c e 32d).

Figura 32 – Volumes de água e ar associados a 100 g de um solo franco-siltoso grumoso, em diferentes teores de umidade.



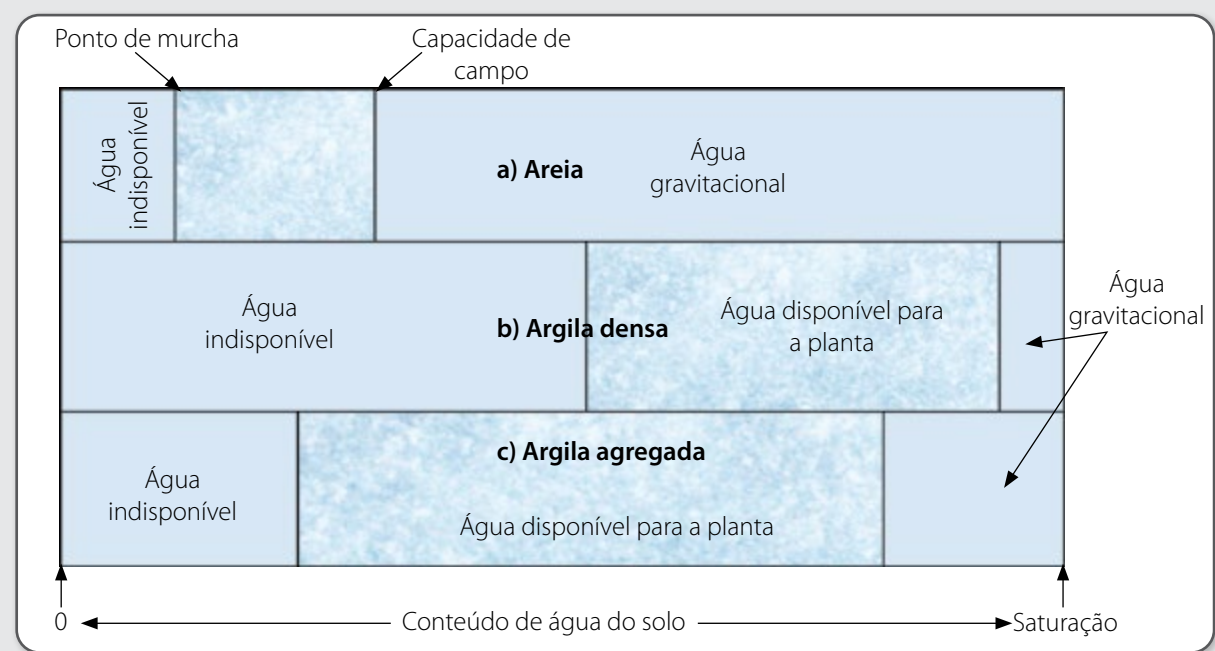
Fonte: Adaptado de Brady; Weil, 2008.

A água no solo é influenciada, principalmente, por duas forças opostas: a **força da gravidade**, que puxa a água para baixo e faz com que ela flua para as camadas mais profundas; e a **força de atração** exercida pelas superfícies sólidas e pelas outras moléculas de água, que favorecem a permanência da água nos poros do solo. Estas últimas são as mesmas forças que mantêm as gotas da água aderidas às superfícies de vidro, e seu efeito é maior nos poros menores (microporos), devido ao maior contato com as partículas sólidas.

Os solos são muito semelhantes a esponjas no modo como retêm e disponibilizam água. Quando uma esponja é totalmente saturada, perde água rapidamente por gravidade e o gotejamento cessa após cerca de 30 segundos. Os poros maiores drenam rapidamente, porque são incapazes de reter a água com força maior do que a força da gravidade. No entanto, quando cessa o gotejamento, a esponja ainda permanece com uma grande quantidade de água, que sairá se for espremida. Este restante de água permanece nos poros menores, que seguram a mesma com força superior à força da gravidade. Essa condição da esponja logo após a drenagem livre é semelhante a um solo que atingiu o conteúdo de água na capacidade de campo (CC) (Figura 32b), o qual ocorre no campo depois de cerca de dois dias de drenagem livre, logo depois de o mesmo ter sido saturado por uma grande chuva ou por irrigação.

Solos que contém, principalmente, poros grandes (solos arenosos), perdem água rapidamente pela drenagem gravitacional. Essa drenagem é acentuada e os poros ficam abertos para as trocas de ar. Por outro lado, sobra pouca água para as plantas utilizarem, o que resulta em períodos mais frequentes de estresse hídrico (Figura 33a).

Figura 33 – Armazenamento de água em três solos distintos.

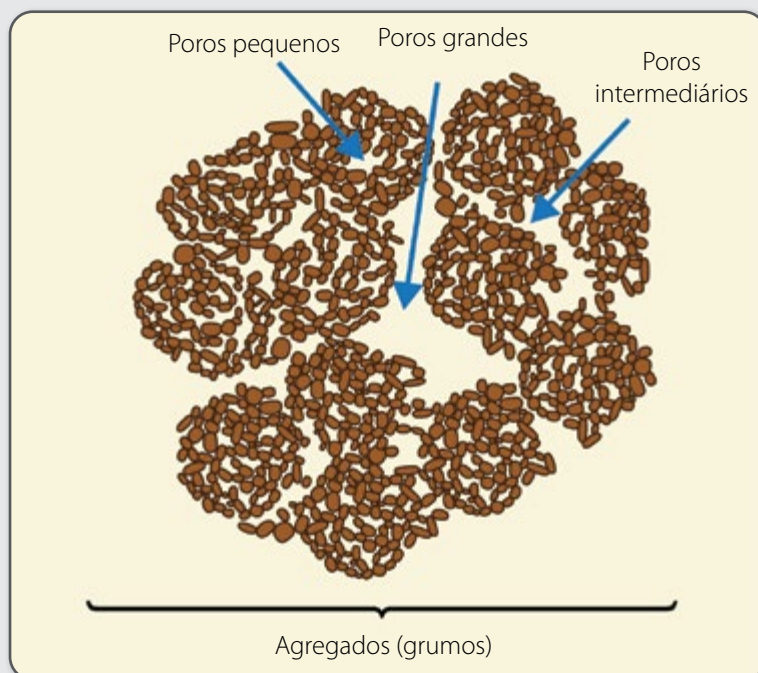


Fonte: Adaptado de Magdoff; Van Es, 2009.

Solos com predominância de areia grossa contêm quantidades muito pequenas de água disponível para as plantas antes de atingirem o ponto de murcha permanente (Figura 33a). Por outro lado, solos de textura fina, densos, tal como um solo franco-argiloso compactado, têm, principalmente, poros pequenos, que retêm firmemente a água e não a liberam pela drenagem gravitacional (Figura 33b). Neste caso, o solo tem mais água disponível para as plantas do que o solo com areia grossa, mas as plantas passarão por períodos longos de má aeração após chuvas intensas que saturarem o solo.

Os poros de diferentes tamanhos promovem distintos efeitos sobre o solo: a lixiviação de pesticidas e nitratos para as águas subterrâneas é controlada pela quantidade relativa de poros de diferentes tamanhos. Solos com predomínio da fração areia podem drenar rapidamente e favorecer a perda desses produtos químicos por meio das águas de percolação. Por outro lado, nos solos argilosos compactos, podem ocorrer condições anaeróbicas devido aos longos períodos de saturação do solo, as quais promovem perda de nitrogênio gasoso por desnitrificação. O solo ideal está entre os dois extremos e seu comportamento é típico daquele exibido por um solo franco bem agregado (Figuras 33c e 34). Solos como este contêm suficiente e amplo espaço poroso entre os agregados que proporciona drenagem e aeração adequadas durante os períodos de chuva, mas também contêm quantidade suficiente de poros pequenos e capacidade de retenção de água para fornecer água às plantas e organismos do solo entre os períodos de chuva ou irrigação. Além de reterem e liberarem água em quantidades quase ideais, esses solos também permitem boa infiltração de água e, conseqüentemente, aumento da disponibilidade de água para as plantas e redução do escoamento superficial e erosão. Esta condição de solo *ideal* é, portanto, caracterizada por agregados similares a grumos, comuns em uma boa cama de semeadura.

Figura 34 – Solos bem agregados contém uma ampla variedade de tamanhos de poros. Os grumos de tamanho médio são compostos por muitos outros grumos de tamanho menor. Os poros grandes ocorrem entre os agregados de tamanho médio.



Fonte: Modificado de Magdoff; Van Es, 2009.

3.4.1 Água disponível e enraizamento

A água pode estar disponível no solo, mas as raízes também precisam ser capazes de acessá-la, juntamente com os nutrientes contidos na água. Se considerarmos um solo com horizonte superficial compactado que foi penetrado apenas por uma única raiz de milho com poucas raízes laterais finas. O volume de solo poderia reter água suficiente, que estava, em princípio, disponível para a planta de milho, mas as raízes não conseguiram penetrar na maior parte do solo em função da resistência elevada. A planta de milho, portanto, não pode obter a quantidade de água de que necessita. Se, em outra situação, as raízes de milho forem capazes de explorar plenamente o volume de solo com muitas raízes, ocorrerá uma melhor absorção de água e nutrientes. Do mesmo modo, a profundidade de enraizamento pode ser limitada por compactação. As raízes podem ser impedidas de penetrar no subsolo em função da presença de uma camada compactada (pé-de-arado ou pé-de-grade) e, por conseguinte, ser limitada a disponibilidade de água e nutrientes. Assim, a disponibilidade de água para a planta é resultado tanto da capacidade do solo de retenção de água (relacionado com a textura, agregação e matéria orgânica) e do volume potencial de enraizamento, que é influenciada pela compactação.

3.5 MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

A matéria orgânica do solo é a base de solos saudáveis e produtivos. A matéria orgânica influencia ou modifica positivamente o efeito de todas as propriedades do solo. Além de participar

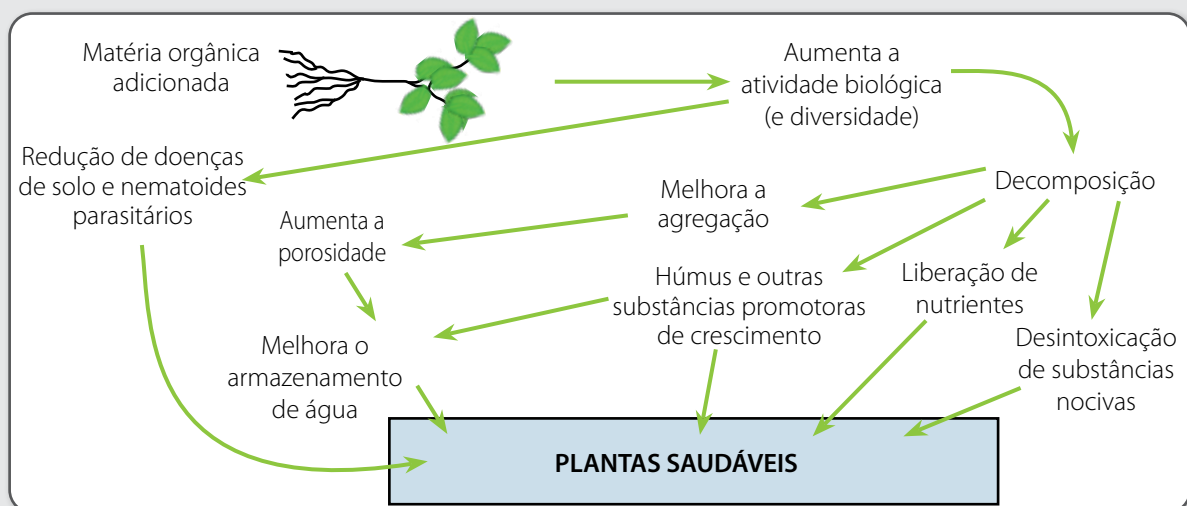
de vários processos que ocorrem no solo e no desenvolvimento das culturas, a matéria orgânica é parte essencial de uma série de ciclos globais e regionais (como por exemplo, o ciclo do C e do N).

Além de matéria orgânica, há outros fatores importantes que determinam a qualidade de um solo. No entanto, quando a matéria orgânica do solo diminui, aumenta a dificuldade de cultivar plantas, porque se tornam mais comuns os problemas com fertilidade, disponibilidade de água, compactação, erosão, ataque de parasitas, doenças e insetos. Quando ocorre o esgotamento da matéria orgânica, são necessários níveis mais altos de insumos (fertilizantes), irrigação, pesticidas e maquinaria para manter os rendimentos das plantas cultivadas. O manejo adequado da matéria orgânica do solo pode permitir boas safras, sem a necessidade de correções caras.

3.5.1 Os benefícios da matéria orgânica

A grande influência da matéria orgânica sobre uma série de atributos do solo (biológicos, químicos e físicos) faz com que seja essencial para a obtenção de solos saudáveis e pode ser visualizada na Figura 35. Parte da explicação para essa influência se refere ao tamanho reduzido das partículas de húmus (a fração bem decomposta). A grande área superficial do húmus o coloca em contato com uma parte considerável do solo. Esse contato íntimo do húmus com o solo possibilita muitas reações, tais como a liberação rápida de nutrientes para a solução do solo. No entanto, os muitos papéis dos organismos vivos tornam a vida do solo uma parte essencial na história da matéria orgânica.

Figura 35 – Influência da matéria orgânica sobre os atributos dos solos e as plantas.



Fonte: Adaptado de Oshins; Drinkwater, 1999.

▪ Nutrição de Plantas

As plantas precisam de dezoito elementos químicos para o seu crescimento: carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), enxofre (S), cálcio (Ca), magnésio (Mg), ferro (Fe), manganês (Mn), boro (B), zinco (Zn), molibdênio (Mo), níquel (Ni), cobre (Cu), cobalto (Co) e de cloro (Cl). Os elementos necessários em grande quantidade: carbono,

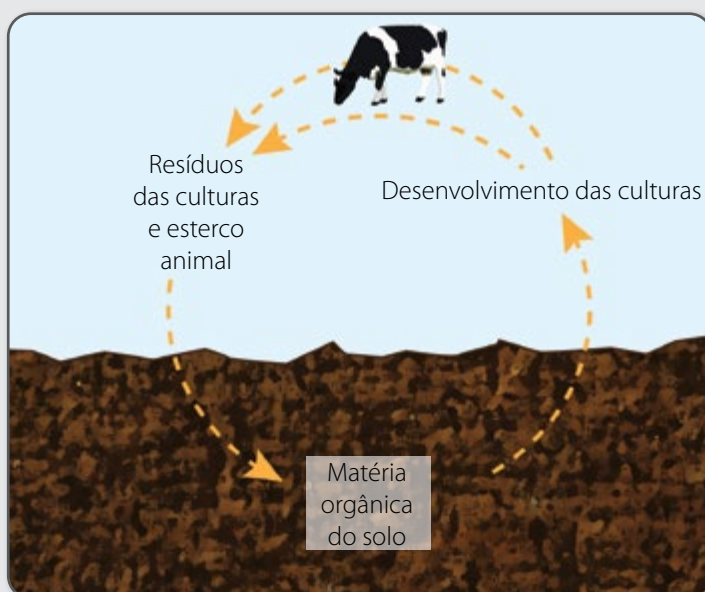
hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre são chamados de macronutrientes. Os outros elementos, chamados de micronutrientes, são elementos essenciais necessários em pequena quantidade.

As plantas obtêm o carbono do dióxido de carbono (CO_2) e, parte do oxigênio, do gás de oxigênio (O_2) provenientes do ar. Os demais elementos essenciais são obtidos, principalmente, do solo. A disponibilidade de nutrientes é influenciada direta ou indiretamente pela presença de matéria orgânica.

▪ Nutrientes que provêm da matéria orgânica em decomposição

A maior parte dos nutrientes na matéria orgânica do solo não pode ser utilizada pelas plantas, porque faz parte de grandes moléculas orgânicas. Quando os organismos do solo decompõem a matéria orgânica, os nutrientes são convertidos em formas minerais simples e inorgânicas, que as plantas podem facilmente utilizar. Esse processo (chamado de mineralização) fornece a maior parte do nitrogênio de que as plantas precisam. Por exemplo, as proteínas são convertidas em amônio (NH_4^+) e, em seguida, em nitrato (NO_3^-), que será absorvido por muitas plantas. A mineralização da matéria orgânica também é um mecanismo importante para o suprimento de fósforo, enxofre e da maior parte dos micronutrientes. Essa liberação de nutrientes da matéria orgânica por meio da mineralização é parte de um ciclo maior dos nutrientes agrícolas (Figura 36).

Figura 36 – O ciclo dos nutrientes das plantas.



Fonte: Adaptado de Magdoff; Van Es, 2009.

▪ Adição de nitrogênio

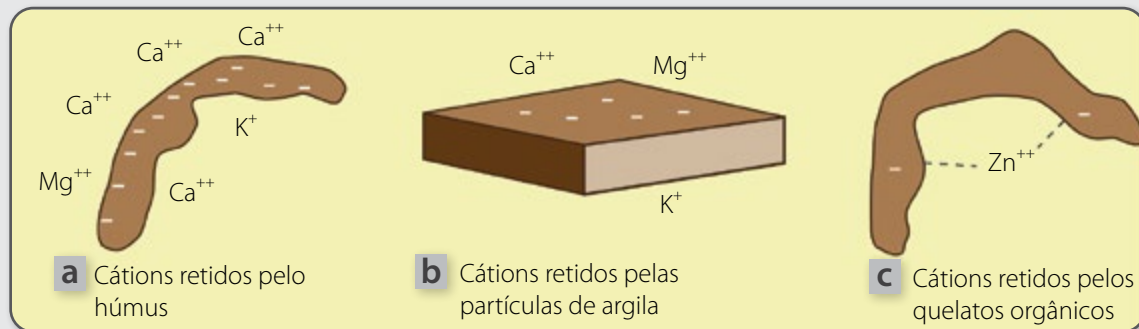
As bactérias que vivem em nódulos das raízes de leguminosas (do gênero *Rhizobium*) convertem o nitrogênio do gás atmosférico (N_2) em formas que a planta pode usar diretamente. Um grande número de bactérias de vida livre também fixa nitrogênio.

▪ **Estoque de nutrientes na matéria orgânica do solo**

A decomposição de matéria orgânica pode alimentar as plantas diretamente, mas também pode beneficiar, indiretamente, a nutrição das mesmas. Uma série de nutrientes essenciais ocorre nos solos em forma de moléculas que apresentam cargas positivas, denominados cátions. A capacidade da matéria orgânica de reter cátions, de forma que fiquem disponíveis para as plantas, é conhecido como **capacidade de troca de cátions** (CTC).

O húmus tem muitas cargas negativas. Devido à atração entre cargas opostas, o húmus é capaz de reter os nutrientes carregados positivamente, tal como cálcio (Ca^{2+}), potássio (K^+) e magnésio (Mg^{2+}) (Figura 37a). Esse processo impede que esses elementos sejam lixiviados para as camadas mais profundas do solo durante o movimento descendente de água. Os nutrientes assim retidos podem ser gradualmente libertados para a solução do solo e disponibilizados para as plantas durante todo o período vegetativo.

Figura 37 – Cátions retidos pelas cargas negativas da matéria orgânica e da argila.



Fonte: Adaptado de Magdoff; van Es, 2009.

Nem todos os nutrientes dos quais as plantas necessitam ocorrem como cátions. Por exemplo, o nitrogênio em forma de nitrato é carregado negativamente (NO_3^-) e é repelido pela CTC (carregada negativamente). Em função disso, o nitrato lixivia facilmente quando a água se move descendentemente através do solo e pode ir além da zona radicular.

As partículas de argila também têm cargas negativas em suas superfícies (Figura 37b). No entanto, em solos arenosos e de textura média, a matéria orgânica pode ser a principal fonte de cargas negativas. Alguns tipos de argilas, tais como aquelas encontradas no Brasil (caulinitas e óxidos), tendem a apresentar pequenas quantidades de cargas negativas em sua superfície. Quando essas argilas estão presentes, a matéria orgânica pode ser a principal fonte de cargas negativas que retêm os nutrientes, mesmo nos solos de textura fina (elevado conteúdo de argila).

▪ **Proteção de nutrientes pela quelatação**

As moléculas orgânicas do solo também podem reter e proteger certos nutrientes. Essas partículas, chamadas “quelatos”, são subprodutos da decomposição ativa de materiais orgânicos e são menores do que as partículas de húmus. Em geral, os elementos são mantidos

mais fortemente por quelatos do que pelas ligações das cargas positivas e negativas. Os quelatos são mais eficientes porque ligam o nutriente na molécula orgânica em mais de um local (Figura 37c). Em alguns solos, elementos-traço como ferro (Fe), zinco (Zn) e manganês (Mn) seriam convertidos em formas indisponíveis se não estivessem ligados a quelatos. Não é raro encontrar solos com baixo teor de matéria orgânica deficientes nesses micronutrientes.

▪ **Outras formas de manter os nutrientes disponíveis**

Há evidências de que a matéria orgânica do solo pode inibir a conversão do fósforo disponível para formas indisponíveis para as plantas. Uma das explicações é que a matéria orgânica reveste as superfícies dos minerais que podem se ligar fortemente ao fósforo disponível, inibindo a reatividade entre os mesmos. Além disso, as substâncias húmicas podem quelatar alumínio (Al) e ferro (Fe), os quais podem reagir com o fósforo da solução do solo. Quando esses metais são mantidos como quelatos, são incapazes de formar um mineral insolúvel com o fósforo.

▪ **Efeitos benéficos dos organismos do solo**

Os organismos do solo são essenciais para manter as plantas bem supridas com nutrientes porque eles quebram a matéria orgânica. Estes organismos tornam os nutrientes disponíveis, liberando-os das moléculas orgânicas. Algumas bactérias fixam o gás nitrogênio da atmosfera, tornando-o disponível para as plantas. Outros organismos dissolvem minerais e tornam o fósforo mais disponível. Quando os organismos do solo não estão presentes e ativos, mais fertilizantes serão necessários para o fornecimento de nutrientes para as plantas.

A melhor proteção contra grandes surtos de pragas e problemas de fertilidade do solo é uma variada comunidade de organismos. Um solo rico em matéria orgânica e suprido continuamente com diferentes tipos de resíduos frescos é o lar de um grupo muito mais diversificado de organismos. A maior diversidade de organismos ajuda a garantir que um número menor de organismos potencialmente nocivos seja capaz de desenvolver populações suficientes para reduzir a produtividade das culturas.

▪ **Preparo do solo**

Quando o solo apresenta uma condição física favorável para o crescimento das plantas, diz-se que apresenta bom preparo. Esse solo é poroso e permite que a água penetre facilmente, em vez de escorrer pela superfície. Mais água pode ser armazenada no solo para que as plantas utilizem entre as chuvas, e menos erosão tende a ocorrer. Um bom preparo também significa que o solo está bem arejado. As raízes podem facilmente obter oxigênio e se livrar do dióxido de carbono. Um solo poroso não restringe o desenvolvimento e a exploração radicular.

Quando um solo apresenta preparo ruim, a estrutura do solo se deteriora e os agregados do solo se quebram, causando aumento da compactação e diminuição da aeração e armazenamento de água. Uma camada de solo pode se tornar tão compactada que as raízes não conseguem crescer. Um solo com excelentes propriedades físicas terá numerosos canais e poros de diferentes tamanhos.

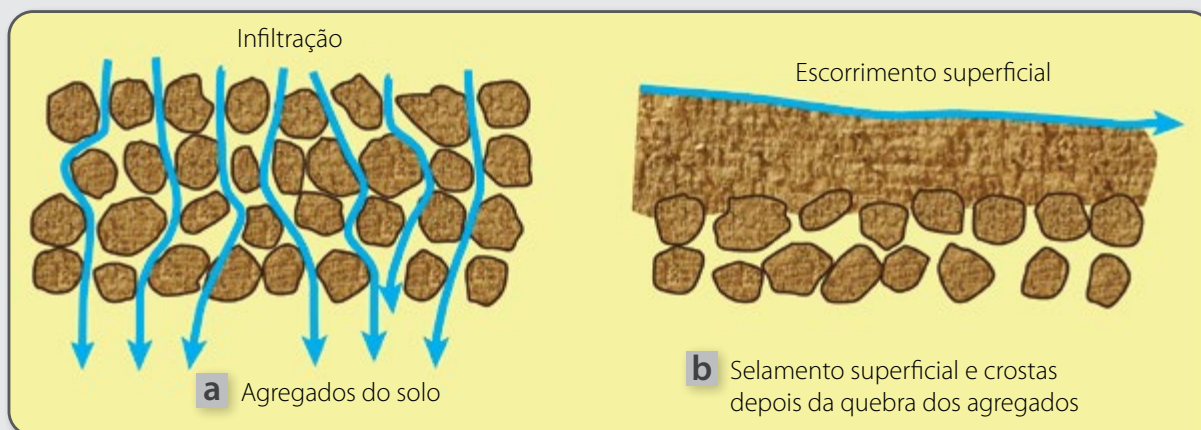
Estudos realizados em solos não perturbados e em solos agrícolas demonstram que, quando a matéria orgânica aumenta, os solos tendem a ser menos compactos e a terem mais espaços para a passagem de ar e armazenamento de água. Durante a decomposição dos resíduos vegetais, são produzidas muitas substâncias pegajosas (gomas). Essas substâncias ligam as partículas minerais com as raízes das plantas e hifas de fungos, formando aglomerados ou agregados. As secreções pegajosas dos fungos micorrízicos (fungos benéficos que entram nas raízes das plantas e ajudam a obter mais água e nutrientes) são importantes gomas do solo. O arranjo dos minerais em agregados e o grau de compactação do solo influenciam o crescimento das plantas. O desenvolvimento de agregados é desejável em todos os tipos de solos, porque promove drenagem mais eficiente e maior arejamento e armazenamento de água.

▪ Erosão do solo

A matéria orgânica, como resíduos na superfície do solo ou como agente de ligação dos agregados próximo da superfície, desempenha um papel importante na redução da erosão do solo. Os resíduos superficiais interceptam as gotas de chuva e diminuem o potencial da mesma para dispersar as partículas do solo. Esses resíduos superficiais também diminuem a água que escorre por toda a lavoura, aumentando-lhe a chance de se infiltrar no solo (Figura 38a). Os agregados e os grandes canais aumentam consideravelmente a capacidade do solo de conduzir água da superfície em direção à subsuperfície.

A erosão tende a remover a parte fértil do solo, o que pode promover redução significativa na produtividade das culturas. Em alguns solos, a perda de apenas alguns centímetros de solo pode resultar em uma redução de rendimento de 50%. A superfície de alguns solos pobres em matéria orgânica pode selar, ou encrostar, quando as chuvas quebram os agregados e os poros próximos à superfície ficam preenchidos com os sólidos. Quando isso acontece, a água que não pode infiltrar no solo escorre pela superfície, carregando a valiosa camada superficial (Figura 38b).

Figura 38 – Mudanças na superfície do solo e no modelo de fluxo de água quando se formam selos e crostas.



Fonte: Adaptado de Magdoff; van Es, 2009.

Os poros grandes do solo, ou canais, são muito importantes devido à sua capacidade de transmitir, rapidamente, uma grande quantidade de água dentro do solo. Os poros maiores são formados de várias maneiras. Os canais radiculares antigos podem permanecer abertos por algum tempo após a raiz se decompor. Os organismos maiores, como insetos e minhocas, criam canais à medida que se movimentam através do solo. O muco que as minhocas secretam para evitar que sua pele resseque, também ajuda a manter os canais abertos por um longo tempo.

▪ **Proteção do solo contra mudanças rápidas na acidez do solo**

Ácidos e bases são liberados quando os minerais do solo são dissolvidos e os organismos exercem suas funções normais de decomposição de materiais orgânicos ou de fixação de nitrogênio. Ácidos ou bases são excretados pelas raízes das plantas, sendo que os ácidos se formam no solo a partir do uso de fertilizantes nitrogenados.

Para as plantas, o ideal é que o nível de acidez do solo, conhecido como pH, não varie muito durante a estação. A escala de pH é uma maneira de expressar a quantidade de hidrogênio livre (H^+) na água do solo. Condições mais ácidas (com maiores quantidades de hidrogênio) são indicadas por números menores. Um solo com pH 4 é muito ácido e sua solução é dez vezes mais ácida do que um solo com pH 5. Um solo com pH 7 é neutro, ou seja, há tanta base na água quanto ácido. A maior parte das culturas se desenvolve melhor quando o solo é ligeiramente ácido e o pH está ao redor de 6 a 7, faixa em que os nutrientes essenciais se tornam mais disponíveis para as plantas. A matéria orgânica do solo é capaz de minimizar, ou tamponar, as mudanças no pH, retirando o hidrogênio livre da solução, quando ácidos são produzidos, ou liberando hidrogênios, quando bases são produzidas.

▪ **Estimulação do desenvolvimento radicular**

Os microrganismos do solo produzem inúmeras substâncias que estimulam o crescimento das plantas. O próprio húmus tem um efeito direto e benéfico sobre as plantas. A explicação para essa estimulação foi associada, principalmente, ao fato de que os micronutrientes se tornam mais disponíveis para as plantas, o que promove aumento do crescimento das mais raízes e de ramificações, resultando em plantas maiores e mais saudáveis. Além disso, muitos microrganismos do solo produzem uma variedade de substâncias estimulantes das raízes, que se comportam como hormônios vegetais.

▪ **Escurecimento do solo**

A matéria orgânica tende a escurecer os solos. Isso pode ser mais facilmente observado em solos arenosos, que contêm minerais de cor clara. Em condições de boa drenagem, as superfícies mais escuras fazem com que o solo se aqueça mais rapidamente nas estações frias. Isso fornece uma ligeira vantagem para a germinação das sementes e para as fases iniciais de desenvolvimento das plântulas, o que muitas vezes é benéfico nas regiões frias.

▪ **Proteção contra elementos químicos prejudiciais**

Alguns elementos químicos que ocorrem naturalmente nos solos podem prejudicar as plantas. Por exemplo, o alumínio é uma parte importante de muitos minerais do solo e, como tal, não constitui uma ameaça para as plantas. Como os solos se tornam mais ácidos, em níveis de pH abaixo de 5,5, o alumínio se torna solúvel. Algumas formas solúveis de alumínio, se presentes na solução do solo, são tóxicas para as raízes das plantas. No entanto, na presença de quantidades significativas de matéria orgânica do solo, o alumínio fica fortemente ligado e não vai provocar danos significativos.

A matéria orgânica é o único atributo do solo que promove redução da lixiviação de pesticidas, porque retém firmemente um grande número desses produtos. Isso impede ou reduz a lixiviação desses elementos para o lençol freático e dá mais tempo para que ocorra a desintoxicação do solo pelos micróbios. Os microrganismos podem alterar a estrutura química de alguns pesticidas, óleos industriais, muitos subprodutos de petróleo (óleos e gases) e outros produtos químicos potencialmente tóxicos, tornando-os inofensivos.

3.6 CAPACIDADE DE TROCA DE CÁTIOS (CTC)

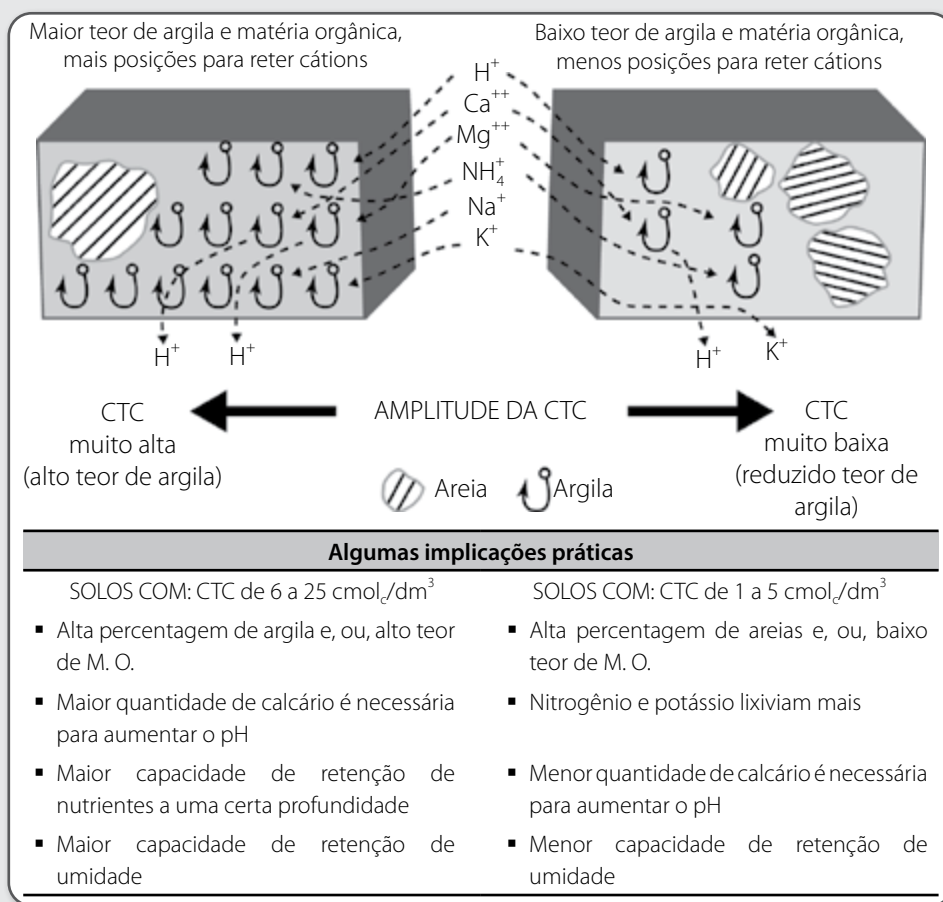
As partículas coloidais do solo (argilominerais e húmus) apresentam cargas elétricas negativas e/ou positivas, sendo que as diferenças entre estas cargas induzem à retenção de cátions ou ânions. Este fenômeno, de extrema importância na natureza, é chamado de capacidade de troca ou adsorção iônica, podendo ser catiônica (**CTC**) (Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+ , etc.) ou aniônica (**CTA**) (NO_3^- , PO_4^- , HPO_4^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , etc.). Como nos solos, em geral, predominam as cargas negativas, os estudos envolvendo CTC são muito mais abundantes do que aqueles sobre CTA (LOPES; GUILHERME, 2004).

Cátions retidos (adsorvidos) nos coloides do solo podem ser substituídos por outros cátions. Isto, em termos práticos, significa que eles são **trocáveis**. O cálcio pode ser trocado por hidrogênio e, ou, potássio, ou vice-versa. O número total de cátions trocáveis que um solo pode reter (a quantidade de sua carga negativa) é chamado de sua Capacidade de Troca (adsorção) de Cátions ou CTC. Quanto maior a CTC do solo, maior o número de cátions que este solo pode reter. Portanto, a CTC é uma característica físico-química fundamental ao manejo adequado da fertilidade do solo (LOPES; GUILHERME, 2004).

Outra maneira de se definir CTC é que este parâmetro indica a quantidade de íons positivos (cátions) que o solo é capaz de reter em determinadas condições e permutar por quantidades estequiométricas equivalentes de outros cátions (íons de mesmo sinal), e é função da intensidade de cargas negativas que se manifesta nos coloides (LOPES; GUILHERME, 2004).

Uma visão esquemática da CTC é mostrada na Figura 39.

Figura 39 – Visão esquemática de Capacidade de Troca de Cátions (CTC) e suas implicações práticas.



Fonte: Adaptado de Instituto da Potassa e do Fosfato, 1998.

Muitos solos encontrados no Brasil, apesar de apresentarem alta porcentagem de argila, comportam-se, em termos de CTC, de modo semelhante av solos arenosos. Isso é explicado pelo fato destas argilas serem, predominantemente, de baixa atividade (caulinita, sesquióxidos de ferro e alumínio, etc.).

A CTC do solo é expressa em termos de quantidade de carga que os coloides podem reter por unidade de peso ou volume, sendo este último mais frequente em análises de rotina. Em geral, nas análises de rotina para avaliação da fertilidade do solo, inclusive nas análises de terra de agricultores, a CTC é expressa em termos de centimol de carga por dm³ (cmol_c/dm³) ou milimol de carga por dm³ (mmol_c/dm³). O termo cmol_c/dm³ equivale, em valores numéricos, ao antigo miliequivalente por 100 cm³ (meq/100 cm³). Em geral, nos trabalhos de Pedologia e na descrição dos perfis de solos, a expressão dos resultados é em cmol_c/kg ou mmol_c/kg (LOPES; GUILHERME, 2004).

3.6.1 Fatores que afetam a CTC

Segundo Lopes e Guilherme (2004), a capacidade de troca de cátions reflete o poder de retenção de cátions que o solo tem. Conseqüentemente, os fatores que alteram o poder de retenção de cátions também alteram a CTC. Entre os fatores, destacam-se os seguintes:

a) **Espécie e quantidade de argila e matéria orgânica**

Minerais de argila usualmente apresentam valores de CTC de 10 a 150 centimol_c/kg. Já os sesquióxidos de ferro e alumínio, muito comuns na fração argila de um grande número de solos brasileiros, apresentam CTC entre 2 e 5 centimol_c/kg.

b) **Superfície específica**

A superfície específica nada mais é que a área por unidade de peso sendo expressa em m²/g. Quanto mais subdividido for o material, maior será a sua superfície específica e maior a CTC do solo.

c) **pH**

A CTC do solo, além de ser influenciada pela espécie e quantidade de argila e matéria orgânica e pela superfície específica, também é fortemente alterada pelo pH do meio. Esse efeito é, principalmente, decorrente da dissociação dos radicais orgânicos e, ou, sesquióxidos de ferro e alumínio, além da desobstrução de cargas da matéria orgânica ocupadas por alumínio, ferro e manganês, conforme explicado anteriormente. A influência do pH do meio na CTC será tanto maior, quanto maiores forem as presenças de espécies de minerais de argila com dominância de cargas dependentes de pH e, ou, matéria orgânica que, praticamente, só apresenta esta característica. A importância destes fatores na CTC justifica um detalhamento maior dos mesmos com o objetivo de ampliar a capacidade de melhor entender a fertilidade dos solos e, conseqüentemente, propor soluções mais adequadas aos problemas nutricionais das plantas.

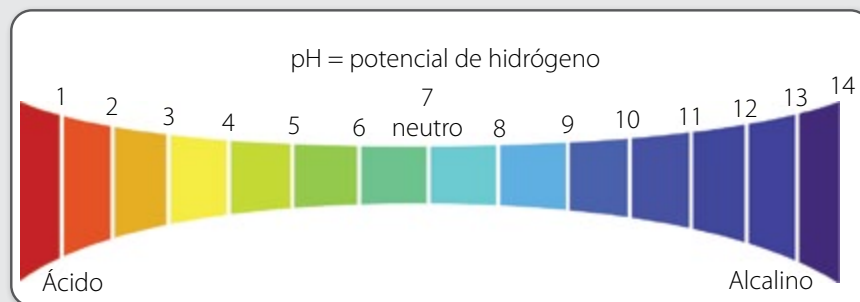
Conhecendo-se melhor a capacidade de troca de cátions de alguns componentes do solo, podem-se fazer inferências importantes sobre o assunto. No Quadro 8 podem ser observados alguns valores de CTC. Nas regiões tropicais, inclusive em grandes áreas no Brasil, onde os solos são mais intemperizados, predominando argilas de baixa atividade e teores baixos a médios de matéria orgânica, os níveis de CTC são baixos. Mas, em regiões onde ocorrem argilas do grupo 2:1 (menos intemperizadas) e os níveis de matéria orgânica são, usualmente, mais altos, valores da CTC podem ser, por natureza, bastante elevados. Solos argilosos, com argilas de alta atividade, podem reter grandes quantidades de cátions. Solos arenosos, com baixo teor de matéria orgânica e, conseqüentemente, baixa CTC, retêm somente pequenas quantidades de cátions, sendo, portanto, mais suscetíveis a perdas de nutrientes por lixiviação.

Do ponto de vista de fertilidade dos solos, são desejados valores elevados de CTC, pois maiores quantidades de cátions podem ser armazenadas e posteriormente, cedidas aos vegetais através de reações de troca iônica (fluxos entre reservatórios). Esses aspectos ressaltam a importância do conhecimento da CTC do solo, para melhor definição de época de aplicação e doses de fertilizantes em um programa de adubação. O que o solo não conseguir reter de nutrientes será lixiviado e perdido, reduzindo a eficiência dos fertilizantes.

3.7 O pH DOS SOLOS

O pH do solo indica a intensidade de acidez ou alcalinidade da solução do solo que banha os constituintes do mesmo, as raízes das plantas e os microrganismos do solo. O pH é medido por uma escala numérica que vai de 1,0 a 14,0, tendo como ponto de equilíbrio representado pelo pH neutro = 7,0. O solo é neutro quando o pH é 7, é ácido quando o pH é inferior a 7 e alcalino quando é maior do que 7 (Figura 40). A escala de pH é logarítmica, de modo que diferença de uma unidade de pH representa uma diferença de dez vezes na acidez ou alcalinidade (por exemplo, o pH 5 é dez vezes mais ácido do que o pH 6).

Figura 40 – Escala de pH.



Fonte: Young, 2013.

3.7.1 Determinação do pH do solo

Tradicionalmente, o pH do solo tem sido medido em laboratório por meio de um eletrodo de pH (peagâmetro) que é introduzido em uma suspensão feita por uma parte do solo e cinco partes de água (1: 5).

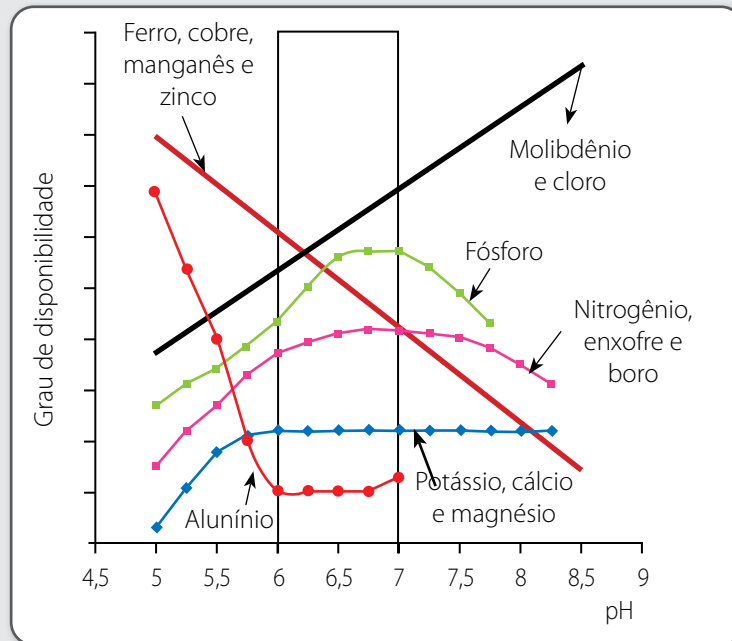
3.7.2 Influência do pH do solo sobre o crescimento das plantas

O pH do solo afeta a disponibilidade de constituintes do solo para as plantas e microrganismos do solo. Para a maioria das plantas, o resultado ideal do teste de pH do solo (água) é pH 6-7,5, embora muitas possam tolerar pH 5,5-8,5. Todavia, a tolerância aos extremos de pH varia entre as espécies de plantas e dentro das espécies. Algumas espécies de plantas apresentam faixa de pH preferencial muito ampla e diferente (por exemplo: aipo 6,0-7,0, batatas 5,0-6,0). Portanto, a necessidade de melhoria do pH solo dependerá de cada situação.

3.7.3 Problemas de pH do solo

O pH dos solos brasileiros é predominantemente ácido e varia de pH 5 a pH 5,5. Essa acidez gera problemas na produção de muitas espécies de plantas agronomicamente importantes e na associação simbiótica do *Rhizobium*. O pH influencia o grau de disponibilidade dos nutrientes essenciais (Figura 41) e, por sua vez, a sua absorção pelas plantas. Devido à complexidade da química do solo, muitas vezes é difícil identificar com segurança a causa do baixo crescimento da planta ou a da nodulação. No entanto, a toxicidade de alumínio e manganês e deficiências de molibdênio e fósforo são causas prováveis de produção pobre em muitos solos ácidos fortes.

Figura 41 – Grau de disponibilidade de nutrientes em função do pH do solo.



Fonte: Adaptado de Raji, 1991.

A CTC do solo também é fortemente alterada pelo pH do meio. Esse efeito é, principalmente, decorrente da dissociação dos radicais orgânicos e, ou, sesquióxidos de ferro e alumínio, além da desobstrução de cargas da matéria orgânica ocupadas por alumínio, ferro e manganês. A influência do pH do meio na CTC será tanto maior, quanto maiores forem as presenças de espécies de minerais de argila com dominância de cargas dependentes de pH e/ou matéria orgânica que, praticamente, só apresenta essa característica.

4 OS SOLOS DO PARANÁ

O sistema de identificação, classificação e mapeamento dos solos do Brasil iniciou-se na década de cinquenta, culminando com o atual Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2013). Esse sistema é dividido em 13 ordens, sendo que algumas não são comuns no Paraná. No Quadro 11 são relacionadas as ordens de solos de maior ocorrência no Estado e, de forma resumida, são dados os conceitos, além de algumas informações sobre as qualidades e limitações ao uso agrícola e os significados do ponto de vista ambiental e urbano.

Quadro 11 – Principais ordens de solos encontradas no estado do Paraná.

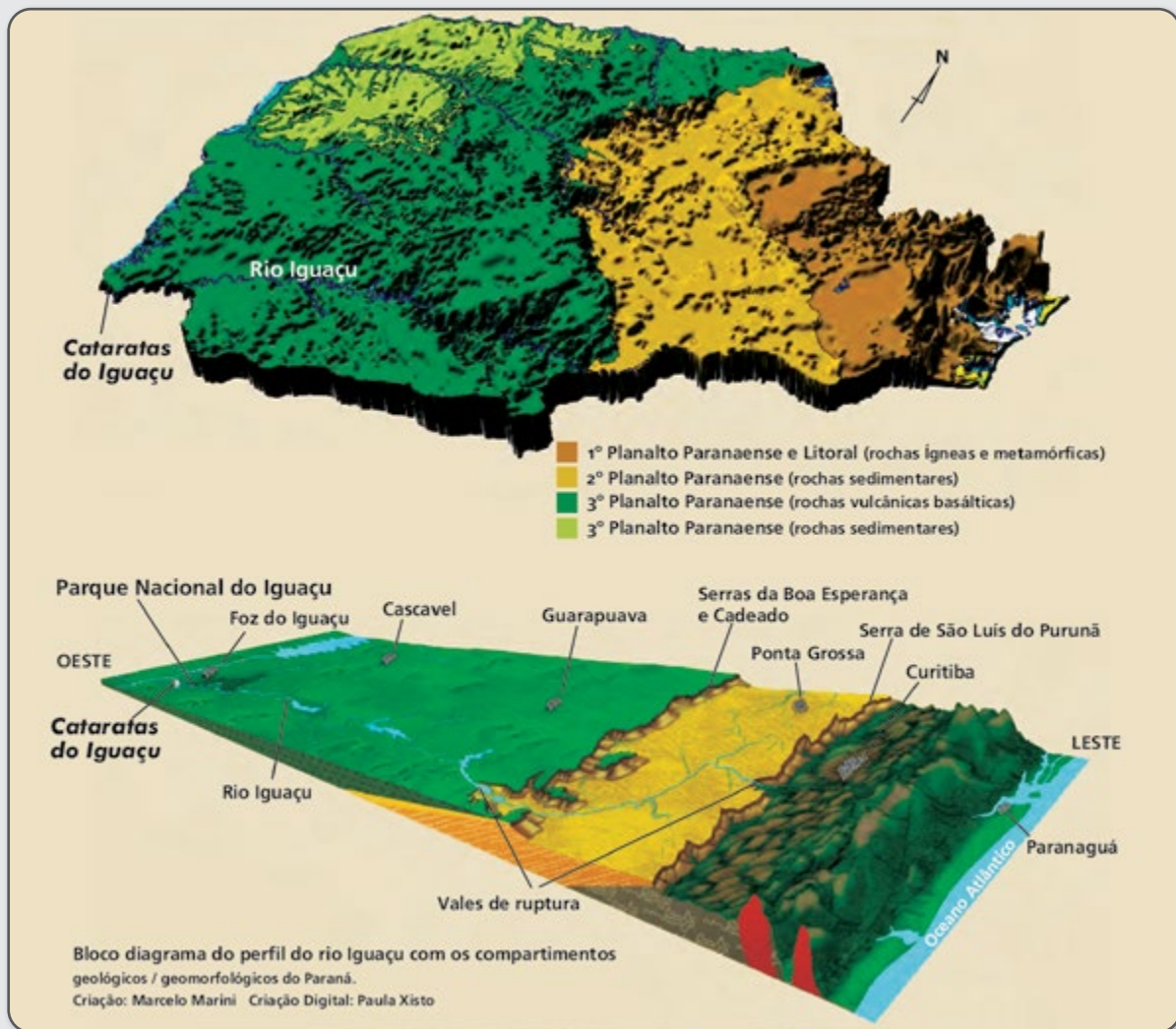
Classe (ordem)	Termos de conotação ou memorização
NEOSSOLOS	Solos jovens, em início de formação (sem horizonte B). Nome derivado do grego (<i>neos</i> = novo).
CAMBISSOLOS	Solos com horizonte B incipiente e em estágio inicial de formação.
ARGISSOLOS	Solos com acumulação de argila no horizonte B.
NITOSSOLOS	Solos com agregados do horizonte B com superfícies brilhantes. Nome derivado do latim (<i>nitidus</i> = brilhante).
LATOSSOLOS	Solos velhos e profundos.
ESPODOSSOLOS	Solos muito arenosos com acúmulo de matéria orgânica e compostos de ferro e alumínio no horizonte B.
GLEISSOLOS	Solos com cores acinzentadas. Nome derivado do russo (<i>gley</i> = massa pastosa).
ORGANOSSOLOS	Solos com altos teores de matéria orgânica.

Fonte: Adaptado de Costa Lima et al., 2012.

4.1 OS SOLOS DA OLERICULTURA PARANAENSE

Para manejar com sucesso o seu solo, é necessário conhecer o tipo de solo com que você está lidando. No estado do Paraná, os solos são originados de rochas ígneas, metamórficas e sedimentares diversas e encontram-se distribuídos em uma paisagem com relevo diversificado (Figura 42), onde predomina o clima subtropical, com estações bem definidas. Esta diferenciação regional se reflete em grande variabilidade de solos, e, por sua vez, em diferentes potenciais agrícolas das terras.

Figura 42 – Mapa geológico e geomorfológico do Paraná e bloco diagrama do perfil do rio Iguazu com os compartimentos geológicos e geomorfológicos.



Fonte: Mineropar, s.d.

Como já mencionado, a olericultura paranaense está distribuída por todo o estado, sobre distintos solos. Com base no Mapa de Solos do Estado do Paraná (BHERING; SANTOS, 2008) e no atual Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2013), seis principais classes de solos representativas das paisagens paranaenses são utilizadas com espécies olerícolas. As características de cada classe e o potencial de uso agrícola podem ser visualizados no Quadro 12.

Quadro 12 – Classes taxonômicas, características e potencial de uso dos solos cultivados com espécies olerícolas nos núcleos regionais de agricultura do estado do Paraná.

LATOSSOLOS (L)

Solos muito evoluídos pela atuação severa dos agentes de intemperismo, com horizonte subsuperficial uniforme em cor, textura e estrutura (B latossólico). São solos, em geral, muito pobres (exceto aqueles originados de rochas ricas em nutrientes), de textura média a muito argilosa, porosos e de alta permeabilidade.

Latossolos vermelhos



CARACTERÍSTICAS E POTENCIAL DE USO AGRÍCOLA

Latossolos de cores vermelhas, de textura média a muito argilosa. São pobres em bases, exceto aqueles originados de rochas ricas em nutrientes. Os derivados de rochas ígneas básicas são ricos em minerais ferromagnesianos. Normalmente, são encontrados em relevo plano a suave-ondulado, o que facilita a mecanização. São profundos, porosos, o que favorece o desenvolvimento radicular em profundidade, nos solos de fertilidade alta. São bem drenados, permeáveis, friáveis e de fácil preparo.

NÚCLEOS REGIONAIS DE OCORRÊNCIA

Londrina, Maringá, Paranavaí, Apucarana, Campo Mourão, Cascavel, Cianorte, Cornélio Procópio, Francisco Beltrão, Irati, Ivaiporã, Jacarezinho, Laranjeiras do Sul, Ponta Grossa, Toledo, Umuarama, União da Vitória

Latossolos brunos



CARACTERÍSTICAS E POTENCIAL DE USO AGRÍCOLA

Latossolos de cores amarelo avermelhadas, argilosos ou muito argilosos, com muita matéria orgânica em superfície e derivados de rochas basálticas e riodacíticas. São profundos e muito porosos, o que favorece o desenvolvimento radicular. Porém, possuem baixo potencial nutricional e teores elevados de alumínio em profundidade, que pode afetar o enraizamento.

NÚCLEOS REGIONAIS DE OCORRÊNCIA

Curitiba, Guarapuava

NITOSSOLOS (N)

Solos de textura argilosa ou muito argilosa (>350 g/kg ou mais de argila), derivados de rochas basálticas. Apresentam pouca diferenciação textural, estrutura bem desenvolvida e cerosidade nítida. São profundos, bem drenados, moderadamente ácidos e de fertilidade muito variável.

Nitossolos vermelhos



CARACTERÍSTICAS E POTENCIAL DE USO AGRÍCOLA

Nitossolos de cores vermelho-escuras a arroxeadas. Derivados de rochas básicas, ricas em minerais ferromagnesianos. São eutróficos ou distróficos. Apresentam grande potencial agrícola, pois os ricos em nutrientes são de elevado potencial produtivo, e os pobres em bases e os ricos em alumínio respondem bem à aplicação de fertilizantes e corretivos. São suscetíveis à erosão se ocorrerem em relevos ondulados. Se o solo for rico em alumínio em profundidade, ocorrem limitações para o desenvolvimento radicular.

NÚCLEOS REGIONAIS DE OCORRÊNCIA

Maringá, Cascavel, Cornélio Procópio, Dois Vizinhos, Laranjeiras do Sul

ARGISSOLOS (P)

Solos bastante evoluídos. No horizonte subsuperficial, apresenta acumulação de argila, grande desenvolvimento de cor e estrutura (B textural). A fertilidade natural é variável, com predomínio de solos pobres em nutrientes.

Argissolos vermelhos



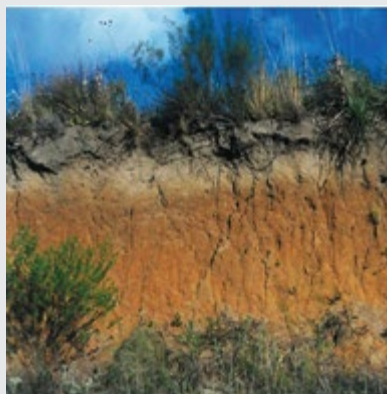
CARACTERÍSTICAS E POTENCIAL DE USO AGRÍCOLA

Argissolos de cores vermelhas acentuadas. Ocorrem, geralmente, em áreas de relevo ondulado, mas podem ser identificados em áreas menos declivosas, o que favorece a mecanização. As principais limitações são os declives dos terrenos mais acidentados, a baixa fertilidade natural e a suscetibilidade à erosão.

NÚCLEOS REGIONAIS DE OCORRÊNCIA

Umuarama

Argissolos vermelho-Amarelos



CARACTERÍSTICAS E POTENCIAL DE USO AGRÍCOLA

Argissolos de coloração vermelho-amarelada. Suas limitações estão mais relacionadas à baixa fertilidade, acidez, teores elevados de alumínio e a suscetibilidade aos processos erosivos, principalmente quando ocorrem em relevos mais movimentados. São suscetíveis aos processos erosivos devido ao gradiente textural, que implica em diferenças de infiltração dos horizontes superficiais e subsuperficiais.

NÚCLEOS REGIONAIS DE OCORRÊNCIA

Cornélio Procópio, Curitiba, Ponta Grossa

CAMBISSOLOS (C)

Solos pouco desenvolvidos, com horizonte subsuperficial pouco evoluído, presença de fragmentos de rochas e minerais primários, fraco desenvolvimento de estrutura e cor (B incipiente). Apresenta teores relativamente mais elevados de silte em profundidade.

Cambissolos háplicos



CARACTERÍSTICAS E POTENCIAL DE USO AGRÍCOLA

Cambissolos com baixa saturação por bases e elevada saturação por alumínio. Quando apresentam espessura no mínimo mediana (50-100 cm) e sem restrição de drenagem, em relevo pouco movimentado, apresentam maior potencial agrícola.

NÚCLEOS REGIONAIS DE OCORRÊNCIA

Curitiba, Irati, União da Vitória

Cambissolos húmicos



CARACTERÍSTICAS E POTENCIAL DE USO AGRÍCOLA

Solos pouco desenvolvidos, com horizonte superficial rico em carbono (A húmico), de baixa fertilidade, geralmente ácidos, sendo mais indicados para cultivos de subsistência, pastagem e reflorestamento.

NÚCLEOS REGIONAIS DE OCORRÊNCIA

Pato Branco

GLEISSOLOS (G)

Solos desenvolvidos em ambientes com grande quantidade de água, mal drenados, com horizontes de cores acinzentadas, azuladas ou esverdeadas (glei), devido à redução e solubilização do ferro.

Gleissolo melânico



CARACTERÍSTICAS E POTENCIAL DE USO AGRÍCOLA

Apresenta baixa fertilidade natural, podendo também apresentar problemas com acidez (pH baixo) e teores elevados de alumínio. São solos mal ou muito mal drenados, em condições naturais. A proximidade com os rios limita o uso agrícola desta classe, sendo área indicada para preservação das matas ciliares.

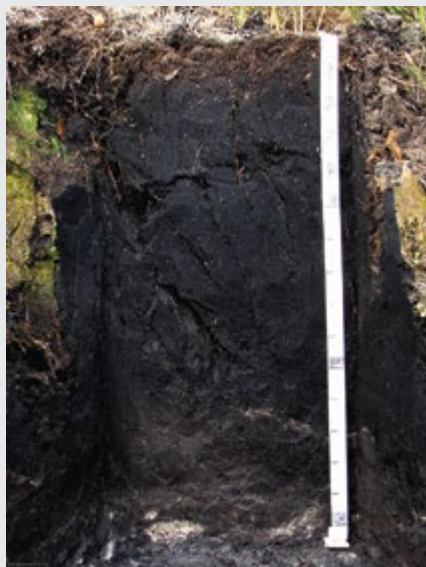
NÚCLEOS REGIONAIS DE OCORRÊNCIA

Curitiba, Ponta Grossa

ORGANOSSOLOS (O)

Solos desenvolvidos em ambientes com acúmulo de água e mal drenados. Contem horizontes orgânicos, de coloração preta ou cinzenta muito escura, com grande proporção de resíduos vegetais. São fortemente ácidos, com alta capacidade de troca de cátions e baixa saturação por bases e, por vezes, teor de alumínio elevado.

Organossolo háplico



CARACTERÍSTICAS E POTENCIAL DE USO AGRÍCOLA

Apresentam limitações ao uso agrícola, associadas à presença de teores elevados de materiais sulfídricos, de sais e de enxofre responsáveis por toxidez à maioria das culturas. Apresentam restrições causadas por drenagem deficiente relacionada aos ambientes de ocorrência, sendo área indicada para preservação permanente.

NÚCLEOS REGIONAIS DE OCORRÊNCIA

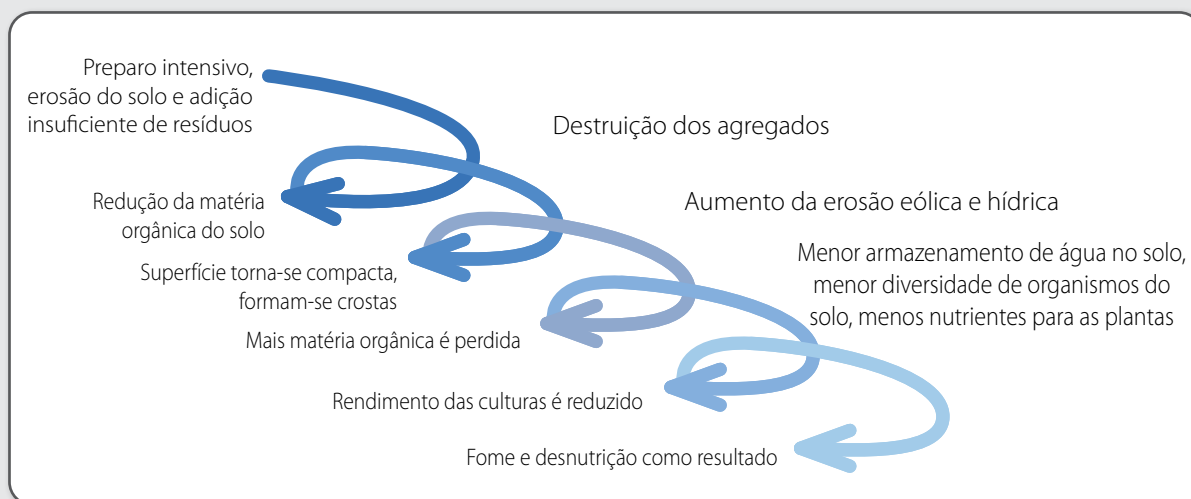
Curitiba, Ponta Grossa

Fonte: Giarola, 2014.

5 PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO DOS SOLOS E SEU CONTROLE

Os processos de degradação são alterações que ocorrem nos atributos dos solos e que acarretam efeitos negativos sobre uma ou várias funções dos mesmos (como a perda de potencial produtivo), sobre a saúde humana ou sobre o meio ambiente (ISO 11074-1, 1/08/1996). A degradação dos solos agrícolas ocorre mais comumente quando os níveis de erosão e o decréscimo da matéria orgânica do solo iniciam uma espiral descendente (Figura 43), resultando em produção ruim das culturas. Os solos tornam-se compactos, o que limita a infiltração de água e o desenvolvimento adequado das raízes. A erosão avança e os nutrientes declinam a níveis muito baixos, limitando o desenvolvimento adequado das culturas. Outra forma de redução da qualidade do solo é a formação de solos salinos (muito salgados) por irrigação, em regiões áridas (os sais adicionados na água de irrigação precisam ser lixiviados para baixo da zona radicular para evitar o problema).

Figura 43 – A espiral descendente da degradação do solo.



Fonte: Adaptada de Topp et al., 1995.

Historicamente, a degradação dos solos causou danos significativos a muitas civilizações, principalmente a perda drástica de produtividade resultante da erosão do solo. Nos dias atuais, estima-se que a erosão tenha progredido o suficiente para diminuir os rendimentos em 36% de todos os solos agrícolas do mundo (FAO, 2011). O valor da perda anual das colheitas devido à degradação dos solos por erosão é de cerca de US\$ 1 bilhão. A erosão é um grande problema global, que rouba o alimento das pessoas e, a cada ano, reduz a produtividade das terras cultivadas.

Estudos recentes indicam que 33% dos solos mundiais têm sido degradados por meio de atividades humanas (FAO, 2011). Essas atividades incluem o uso inadequado de terras agrícolas, práticas inadequadas de manejo da água e do solo, desmatamento, remoção da vegetação natural, uso frequente de máquinas pesadas, excesso de pastagens, rotação incorreta de cultivos e práticas de irrigação inadequadas. Com o crescimento da população, que deve passar de 9 bilhões de pessoas em 2050, haverá 60% de aumento na demanda por alimentos, o que só irá sobrecarregar mais ainda os recursos da terra.

6 EROÇÃO DOS SOLOS

A erosão é um fator importante na degradação dos solos e causa efeitos sérios sobre as funções dos mesmos – tais como sua capacidade de atuar como amortecedor e filtro de poluentes, seu papel no ciclo da água e do nitrogênio e sua capacidade de providenciar hábitat e sustentar a biodiversidade.

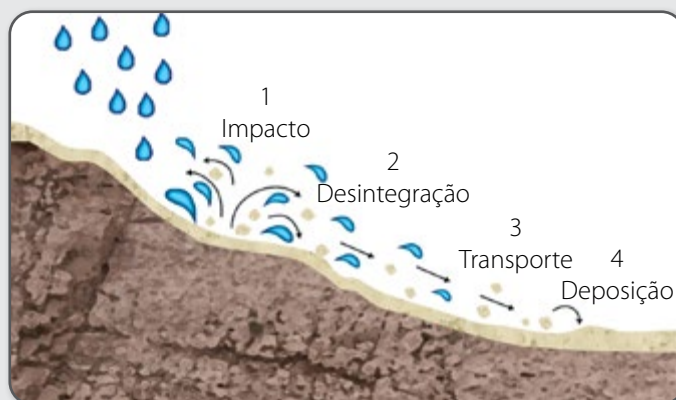
6.1 DEFINIÇÃO, MECANISMO E IMPACTOS

Erosão é o processo de desprendimento, transporte e deposição de partículas do solo, de matéria orgânica e de nutrientes dos vegetais, causado pela ação dos agentes erosivos, principalmente pela água em movimento e pelo vento (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990). No estado do Paraná, o principal agente erosivo é a água das chuvas (erosão hídrica).

O processo de erosão hídrica se inicia quando as gotas de chuva atingem a superfície do solo desnudo e destroem os agregados da superfície. Quatro etapas podem ser distinguidas nesse processo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990) (Figura 44):

- 1ª) **impacto** das gotas de chuva sobre a superfície do solo descoberto;
- 2ª) **desintegração** dos agregados do solo em partículas, as quais obstruem poros e formam uma superfície selada;
- 3ª) salpicamento e **transporte** das partículas desprendidas pela água que escorre em superfície; e,
- 4ª) **deposição** das partículas em algum lugar abaixo de sua origem, quando a velocidade do escoamento superficial de água é reduzida.

Figura 44 – As etapas do processo erosivo.



Fonte: Adaptado de Hudson, 1995.

O processo erosivo é considerado um dos piores fatores de degradação dos solos. Quando a erosão hídrica acontece, ela começa pelos horizontes superficiais (camada fértil), onde existe o acúmulo de matéria orgânica, essencial para a manutenção de muitos ecossistemas. Quando

esses horizontes são perdidos pela erosão, os horizontes subsuperficiais são expostos (Figura 45) e, dependendo da sua composição química, podem ser impróprios para o desenvolvimento das plantas. Com isso, fica difícil restaurar a área para a agricultura ou mesmo para recuperar a vegetação natural.

Figura 45 – Exposição do horizonte subsuperficial em função da remoção da camada superficial do solo pelo processo de erosão hídrica.



Fonte: NRCS, 2011.

Os problemas causados pela erosão hídrica do solo vão além da remoção da camada fértil. A emergência das culturas, o crescimento e a produção são diretamente afetados pela perda de nutrientes naturais e fertilizantes aplicados. As sementes e as plantas podem ser perturbadas ou completamente removidas pela erosão. A matéria orgânica do solo, resíduos e qualquer adubo aplicado são relativamente leves e podem ser facilmente transportados para fora da área, especialmente nos períodos de chuva. Os pesticidas também podem ser levados para fora do sistema com o solo erodido.

A qualidade do solo, estrutura, estabilidade e textura, podem ser afetadas pelas perdas de solo por erosão. O rompimento dos agregados e a remoção de partículas menores ou camadas inteiras de solo ou matéria orgânica pode enfraquecer a estrutura e até mesmo alterar a textura. Mudanças texturais e de matéria orgânica, por sua vez, podem afetar a capacidade de troca de cátions (CTC) e a capacidade de retenção de água do solo, tornando-o mais pobre e suscetível a condições extremas, tais como secas.

Os impactos da erosão do solo causada pela água das chuvas vão além do ponto em que se iniciou o processo e nem sempre são percebidos. O solo erodido, depositado nas porções mais baixas das vertentes (Figura 46), inibe ou retarda a germinação de sementes, soterra pequenas mudas, o que acaba exigindo o replantio nas áreas afetadas. Além disso, os sedimentos podem se acumular nas áreas agrícolas à jusante e provocar danos às estradas.

Figura 46 – Solo erodido, depositado na porção mais baixa de área cultivada.



Fonte: Benassi, 2012.

Os sedimentos que atingem os córregos ou cursos de água podem acelerar a erosão das margens, obstruir canais de fluxo e de drenagem, preencher reservatórios (Figura 47), danificar o habitat de peixes e degradar a qualidade da água à jusante. Os pesticidas e fertilizantes muitas vezes transportados junto com o solo erodido, contaminam ou poluem as fontes de água, brejos e lagos à jusante. A gravidade dos impactos provocados no ambiente, além do ponto em que se iniciou o processo erosivo, justifica o controle mais amplo da poluição das terras agrícolas.

Figura 47 – Assoreamento de lagoa por solo erodido pela água das chuvas.



Fonte: NRCS, 2011a.

6.2 FATORES QUE INFLUENCIAM A EROSÃO

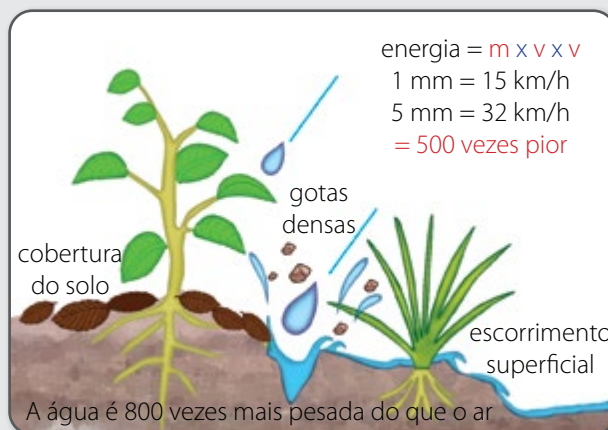
6.2.1 Chuvas

A chuva é considerada o principal agente da erosão do solo no Paraná. Sua ação se dá pelo impacto das gotas precipitadas sobre o solo (DERPSCH et al., 1991). As gotas atuam como bombas em miniatura, que golpeiam a superfície do solo, rompendo os grânulos e torrões de solo (Figura 48a), reduzindo-os a partículas menores, lançando-as para longe e, ainda, diminuindo a capacidade de infiltração de água no solo e aumentando a turbulência da água superficial (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990).

Figura 48 – Impacto das gotas de chuva e desprendimento de partículas do solo.



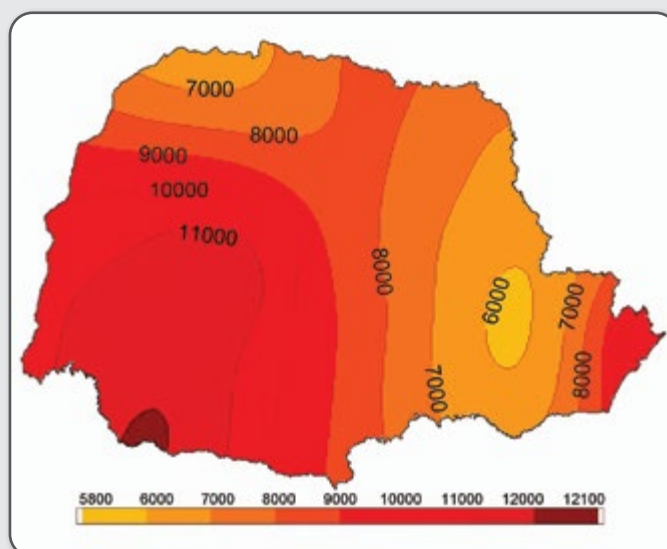
Fonte: adaptado de Hudson, 1995.



Em chuvas normais, as gotas variam de 1 a 7 milímetros de diâmetro e batem no solo a cerca de 30 km por hora (Figura 48b). O impacto de milhões de gotas de chuva que atingem a superfície do solo desprotegida pode ser incrível, desalojando as partículas do solo e salpicando-as de 3 a 5 metros de distância. Uma chuva pesada pode salpicar até 90 toneladas de solo por hectare. No entanto, a maior parte do solo salpicado não é imediatamente perdida a partir do ponto de impacto. A maior parte das partículas do solo salpicadas não deixa o local, pois elas obstruem os poros da superfície, o que por sua vez reduz a infiltração de água, aumenta o escoamento da água superficial e a erosão do solo.

A capacidade da chuva em provocar erosão é chamada **erosividade** (HUDSON, 1995). A erosividade pode ser determinada a partir de dados pluviométricos como a intensidade (mm/h), a duração (h) e a frequência (intervalo entre as chuvas), o que justifica a importância do conhecimento do regime pluviométrico para o planejamento conservacionista de qualquer região. No Paraná, há mapas isoerodentes do estado disponíveis para consulta. Porém o mais recentemente foi gerado por Waltrick (2010) e pode ser visualizado na Figura 49.

Figura 49 – Mapa isoerodente do estado do Paraná. Estimativa atualizada com dados de 1986 a 2008, valores médios anuais em $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.



Fonte: Waltrick, 2010.

No mapa isoerodente (Figura 49) podem ser observadas as regiões que apresentam as chuvas mais erosivas, conforme a escala de cores. Pode-se perceber que as regiões Sudoeste, Oeste e Litoral

estão sujeitas à ação de chuvas mais erosivas, o que exige maiores cuidados no planejamento conservacionista dos solos cultivados.

6.2.2 Topografia

A topografia do terreno exerce acentuada influência sobre a erosão. Com relação à topografia, três características são importantes: **grau de declive, comprimento e forma da encosta** (ou vertente).

O **grau de declive** influi diretamente na velocidade da enxurrada (Quadro 13). Quanto maior a declividade do terreno, maior a velocidade da enxurrada e, conseqüentemente, maior sua força desagregadora e sua capacidade de transporte de partículas grandes. Nos solos de relevos mais planos, o excedente hídrico pode acumular-se sobre o solo por causa da dificuldade de escoar, podendo ocasionar danos físicos (p. ex., saturação de água por longo período, maior facilidade de compactação). Nos solos que ocorrem em relevo pouco ondulado (3 a 8% de declividade), as enxurradas escorrem com baixa velocidade, portanto, com menor risco de erosão.

Quadro 13 – Valores aproximados da velocidade de escoamento da enxurrada.

Declividade do terreno	Cobertura vegetal da encosta		
	Floresta	Pastagem	Culturas anuais
%	----- m s ⁻¹ -----		
0-4	0,30	0,45	0,60
4-10	0,60	0,90	1,20
10-15	1,00	1,20	1,50
15-20	1,20	1,50	1,70
20-25	1,40	1,60	1,80
25-30	1,50	1,80	1,90

Fonte: Bertoni; Lombardi Neto, 1990.

Em princípio, quanto maior a extensão livre da encosta, maior o volume e a velocidade da enxurrada, por conseguinte, de seu poder erosivo. O tamanho e a quantidade de partículas arrastadas pela enxurrada dependem do volume e da velocidade com que a água escorre, o que está diretamente relacionado com o **comprimento livre da vertente**. Um exemplo de efeito da extensão livre da encosta sobre o potencial de perdas de solos pode ser observado nos dados apresentados no Quadro 14. Por exemplo, nos 25 m finais de uma rampa de 100 m se perde 4 vezes mais solo que nos primeiros 25 m.

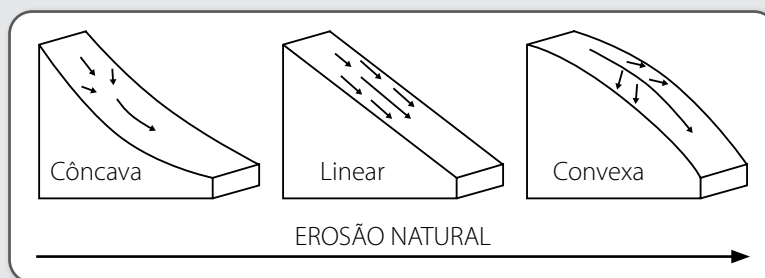
Quadro 14 – Efeito do Comprimento de Rampa nas perdas de solo. Médias na base de 1.300 mm de chuva e declives entre 6,5 e 7,5 %.

Comprimento de rampa	Média	Primeiros 25 m	Segundos 25 m	Terceiros 25 m	Quartos 25 m
m	t ha ⁻¹				
25	13,9	13,9	--	--	--
50	19,9	13,9	25,9	--	--
75	26,2	13,9	25,9	38,8	--
100	32,5	13,9	25,9	38,8	51,4

Fonte: Bertoni; Lombardi Neto, 1990.

A **forma da encosta**, dependendo de seu perfil (inclinação) e de sua curvatura, tem grande influência na convergência e, ou, divergência do escoamento superficial da água das chuvas (Figura 50). As formas côncavas, predominantes nos solos mais jovens (como os Neossolos e os Cambissolos), favorecem a convergência, conseqüentemente, a retenção máxima de enxurradas; as convexas, predominantes nos mais velhos (como os Latossolos), o contrário. Um resumo do efeito da forma da rampa sobre a erosão dos solos pode ser observado no Quadro 15.

Figura 50 – Influência da forma da encosta sobre o escoamento superficial.



Fonte: Adaptado de Resende et al., 1997.

Quadro 15 – Influência da forma da encosta sobre a erosão dos solos.

Côncava	Convexa
<ul style="list-style-type: none"> • Convergência das águas • Erosão mais localizada; tendência à formação de sulcos e voçorocas • Espessura do “sólum” tende a ser desigual • Erosão e deposição • Sementes e nutrientes acumulam-se nas partes mais baixas • Instabilidade maior é pela ausência de cobertura vegetal densa nas áreas de concentração d’água 	<ul style="list-style-type: none"> • Divergência das águas • Erosão mais uniforme e laminar • Espessura do “sólum” tende a ser uniforme • Só erosão • Sementes e nutrientes são retirados do sistema • Instabilidade maior é pela concentração da água

Fonte: Adaptado de Resende et al., 1997.

6.2.3 Atributos do solo

Sob as mesmas condições, diferentes tipos de solo podem comportar-se de modo diverso em relação à erosão hídrica. Isso ocorre devido às diferenças entre os seus atributos. Por exemplo, solos profundos com boa permeabilidade e bem estruturados, desde que razoavelmente coerentes, são normalmente menos sujeitos à erosão hídrica. Solos mais rasos, compactados, com diferenças acentuadas de textura e estrutura entre as diversas camadas, sob as mesmas condições de clima e relevo, são mais sujeitos à erosão.

O termo **erodibilidade** refere-se à habilidade potencial do solo em resistir à erosão hídrica, governada pelas características e propriedades do solo. **A erodibilidade é a perda média de solo por unidade do fator erosividade quando o solo é mantido sem vegetação e sem prática de controle da erosão, em parcelas-padrão originalmente com 22,13 m de comprimento e 9% de declive.**

A erodibilidade é o fator mais importante para a escolha de práticas conservacionistas, devido ao fato de refletir, para os diferentes solos, perdas variáveis quando sob mesmas condições de declive, comprimento de rampa, manejo e chuva.

a) **Fatores que afetam a erodibilidade dos solos**

▪ **Constituintes mineralógicos**

Diferenças de erodibilidade encontradas em solos não podem ser atribuídas apenas ao conteúdo de argila, mas também à natureza do mineral constituinte. Solos com argilas do tipo 2:1 expansivas são, normalmente, menos resistentes ao impacto da gota de chuva do que solos caulíníticos (tipo 1:1) com óxidos de ferro e alumínio (FERREIRA et al., 1999).

▪ **Matéria orgânica do solo**

O **teor de matéria orgânica** do solo tem grande relação com sua erodibilidade. A matéria orgânica tem efeito na estruturação dos solos e formação dos agregados. Nos solos mais ricos em matéria orgânica, a capacidade de aglutinação de partículas do solo é maior, aumentando sua capacidade de retenção de água e infiltração. A matéria orgânica da superfície do solo ajuda sobremaneira a evitar a desagregação e o deslocamento de partículas, evitando assim erosão pronunciada (RESENDE et al., 1997). A erodibilidade do solo tende a diminuir apreciavelmente com o aumento do teor de matéria orgânica. Contudo, em solos que apresentam elevada porcentagem de argila, pequenas variações no teor de matéria orgânica não influenciam tanto a erodibilidade (TROEH et al., 1980).

▪ **Textura do solo**

As partículas do solo não são igualmente deslocadas pelas águas da chuva no processo erosivo. As **partículas maiores** (fração areia) são facilmente desagregadas em um solo arenoso ou de textura média, porém resistem mais à remoção, pois requerem maior velocidade da enxurrada para serem transportadas a longas distâncias, tendendo a se acumularem na superfície do solo (RESENDE et al., 1997).

As **partículas mais finas** (fração argila) são mais difíceis de serem desagregadas pelo impacto das gotas de chuva, mas podem ser facilmente transportadas pelas enxurradas a longas distâncias.

Os **solos siltosos** são os mais facilmente erodíveis pela água, devido ao fato de as partículas de silte serem bastante grandes para ficarem bem aderidas entre si e suficientemente pequenas para serem transportadas rapidamente (BARUQUI; FERNANDES, 1985). Os teores de silte e areia muito fina estão entre os principais parâmetros responsáveis pela erodibilidade dos solos.

▪ **Estrutura do solo**

A estrutura desempenha um papel fundamental na erodibilidade do solo, influenciando a velocidade de infiltração, resistência à dispersão, deslocamento por salpico, abrasão e forças de transporte e escoamento superficial (SUAREZ DE CASTRO, 1980).

A **estrutura granular**, quando comparada às estruturas maciça, laminar e em blocos, apresenta erodibilidade menor. Por outro, os grânulos pequenos e muito pequenos, facilmente transportados pela água e provenientes da estrutura granular, se aproximam do formato de esfera e apresentam um mínimo de área exposta por unidade de volume, proporcionando baixa coerência entre eles e facilitando a ação da água e, conseqüentemente, o arraste das partículas (RESENDE et al., 1997).

As placas de argilas silicatadas tendem a assumir um arranjo face a face (**estrutura em blocos**) conferindo ao sistema maior coesão e menor permeabilidade. Havendo teores substanciais de óxidos de alumínio (gibbsita), óxidos de ferro (hematita, goethita) e/ou matéria orgânica, a estrutura tende a se transformar de blocos para granular, com formato semelhante a esferas, reduzindo a coesão e aumentando a permeabilidade (RESENDE et al., 1997).

▪ **Permeabilidade e capacidade de armazenamento de água**

A permeabilidade do solo e a capacidade de armazenamento de água (normalmente, correlacionada com a espessura do perfil de solo) determinam a quantidade de enxurrada. As condições que mais comumente limitam a permeabilidade do solo são: a) **encrostamento superficial** causado pelo impacto das gotas de chuva ou pelo tráfego de máquinas e animais; b) **subsolos compactados ou adensados**; e c) **leitos rochosos**. Quanto mais próxima da superfície estiver a camada de impedimento físico, menor a quantidade de água necessária para saturar o solo e causar o início do escoamento.

O **tipo** e a **quantidade de material coloidal** do solo afetam acentuadamente a velocidade de infiltração. Por exemplo, solos ricos em material coloidal expansível, como as argilas 2:1, tendem a se expandir quando molhado, reduzindo o tamanho dos poros do solo, conseqüentemente, a capacidade de infiltração. Por essa razão, quanto maior a umidade do solo quando iniciam as chuvas, menor é a capacidade de infiltração nesses solos.

Nos **solos argilosos**, com menor macroporosidade, a capacidade de infiltração de água é menor, resultando em maior quantidade de enxurrada com maior potencial erosivo. Todavia, devido à maior força de coesão entre as partículas de argila, os solos argilosos oferecem maior resistência do que os arenosos ao fluxo de enxurrada. Em função da maior coerência entre as partículas, por conseguinte, menor facilidade de desagregação, quanto mais argilosos o solo, maior a tendência para que o tipo de erosão predominante seja laminar. Ao contrário, nos solos mais arenosos, tende a prevalecer a erosão em sulcos. Os **solos arenosos**, ricos em macroporos e muito permeáveis, durante uma chuva de pouca intensidade, podem absorver toda a água. Entretanto, por possuírem baixa proporção de partículas argilosas e matéria orgânica (elementos ligantes entre as partículas grandes), o escoamento das enxurradas,

mesmo em pequena quantidade, pode causar o arrastamento de grande quantidade de solo, devido à baixa coerência entre as partículas.

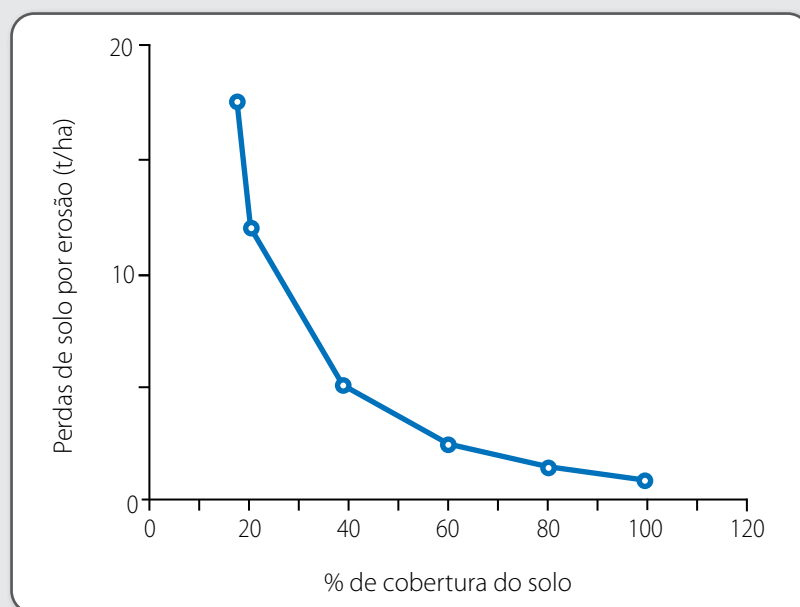
O **grau de agregação** do solo é outro fator que afeta a permeabilidade. Se as partículas mais finas estão bem agregadas, os espaços porosos entre elas são maiores, proporcionando maior velocidade de infiltração. Práticas de manejo do solo que propiciam maior agregação de suas partículas, como o cultivo mínimo, melhoram as condições estruturais, por conseguinte, a permeabilidade.

Quanto **menor for o gradiente textural** e maior for a permeabilidade dos horizontes do solo, maior sua capacidade de drenagem, menores os riscos de saturação e escoamento superficial das águas da chuva. Nestas circunstâncias, práticas mais intensivas de preparo do solo são menos nocivas à sua conservação. Solos com **elevado gradiente textural** entre camadas, como alguns Argissolos com mudança textural abrupta entre os horizontes A e B (p. ex. textura arenosa/argilosa), apresentam grandes diferenças de permeabilidade ao longo do perfil, por conseguinte, maiores riscos à erosão. Seus preparos devem ser em épocas menos chuvosas e com pequeno revolvimento de suas camadas.

6.2.4 Cobertura vegetal ou de resíduos vegetais

A cobertura vegetal é a defesa natural dos solos contra a erosão. Os efeitos benéficos da cobertura vegetal na redução de perdas de solo podem ser visualizados na Figura 51. Observe que à medida que aumenta o percentual da superfície do solo coberta com resíduos vegetais as perdas de solo por erosão são reduzidas. A cobertura de 40% da superfície do solo permitiu reduzir em cerca de quatro vezes as perdas de solo por erosão hídrica.

Figura 51 – Efeito da cobertura do solo na intensidade de erosão do solo.



Fonte: Adaptado de Pimentel; Kounang, 1998.

Os resíduos vegetais depositados sobre o solo e as copas das árvores impedem o impacto direto das gotas de chuva sobre os agregados do solo. Dessa forma, os agregados não são desintegrados em suas partículas básicas: areia, silte e argila, evitando o desencadeamento do processo erosivo. Além disso, a vegetação e os resíduos vegetais funcionam como obstáculos ao caminamento de excedentes hídricos, reduzindo a velocidade da enxurrada.

Quando cai em um terreno coberto com vegetação, a gota de chuva se divide em inúmeras gotículas, diminuindo, também, sua energia de impacto. Somado a isso, a capacidade de transporte é reduzida porque os resíduos formam a série complexa de diques que reduzem a velocidade do escoamento. Em terreno descoberto, a gota de chuva faz desprender e salpicar as partículas de solo, que são facilmente transportadas pela água (Figura 52).

Figura 52 – Com ausência de cobertura, as gotas de chuva podem salpicar as partículas do solo até 60 cm de altura (a). A cobertura de resíduos amortece a queda das gotas de chuva e reduz ou elimina o salpicamento erosivo (b). Pequenos diques naturais são formados e causam o represamento do escoamento superficial (c). O sedimento é depositado nestas pequenas poças de água e permanece no campo.



Fonte: Adaptado de Derpsch et al., 1991.

A cobertura vegetal também reduz o encrostamento e o selamento da superfície do solo (Figura 53) e, por sua vez, o escoamento superficial induzido pela mesma.

Figura 53 – Encrostamento superficial do solo (a) e fragmento de crosta (b) provocados pelo impacto da gota de chuva em Cambissolo Háplico do município de Irati, PR.



Fonte: Giarola, 2011.

O escoamento superficial pode ser reduzido se a taxa de infiltração for mantida e se a superfície do solo permitir um tempo maior para a infiltração. Com o aumento do tempo de permanência das águas de escoamento sobre o terreno, as taxas de infiltração são maiores, diminuindo as perdas de água do sistema, reduzindo o poder erosivo da enxurrada. Esses efeitos

são diretamente proporcionais à quantidade de biomassa acumulada, as quais dependem da produtividade do local e das práticas de manejo adotadas (Quadro 16).

Quadro 16 – Efeito do manejo dos resíduos vegetais sobre as perdas por erosão. (declives entre 8,5 e 12,0% e precipitação média de 1.300 mm).

Tipo de manejo dos resíduos vegetais	Perdas de	
	Solo	Água
	t ha ⁻¹	% da Chuva
Resíduos vegetais queimados	20,2	8,0
Resíduos vegetais incorporados ao solo	13,8	5,8
Resíduos vegetais sobre a superfície do solo	6,5	2,5

Fonte: adaptado de Bertoni; Lombardi Neto, 1990.

Outro benefício da cobertura vegetal ou dos resíduos vegetais é a proteção da superfície do solo da incidência direta da radiação solar, reduzindo as perdas de água por evaporação e minimizando as amplitudes térmica e hídrica do solo ao longo do ano. Com isso, a atividade de organismos do solo (micro, meso e macrofauna) é maior em função do aumento da disponibilidade de alimentos e do controle do efeito esterilizante e dessecante da radiação solar direta, melhorando as condições estruturais do solo.

A abundância e a distribuição de raízes nas camadas de solo influenciam na estruturação do solo. O efeito do sistema radicular sobre a formação e estabilização dos agregados ocorre por meio do aporte regular de matéria orgânica (oriunda da decomposição de raízes finas e, principalmente, da serapilheira), da ação física e química do sistema radicular (crescimento e exsudação de polissacarídeos) (GONÇALVES; MELLO, 2000) e pela proteção dos agregados das camadas superficiais do impacto direto das gotas de chuva (Figura 54).

Figura 54 – Estrutura do solo de grau forte associada à ação de raízes e organismos do solo.



Fonte: Denardin; Kochhann, 2007.

No Quadro 17 pode-se observar o resultado da ação de diferentes tipos de coberturas vegetais nas perdas de solo e água pela erosão. Há considerável diferença entre as culturas quanto às quantidades de solo e água perdidas no processo de erosão, em função do comportamento das diferentes densidades de vegetação. Verifica-se uma relação direta entre as taxas de erosão e o tempo de cultivo, a cobertura do solo e o tipo de sistema radicular.

Quadro 17 – Efeito do tipo de cobertura vegetal sobre as perdas de solo e água por erosão.

Tipo de cobertura vegetal	Perdas de	
	Solo	Água
	t ha ⁻¹ ano ⁻¹	% da Chuva
Mata Nativa	0,004	0,7
Reflorestamento	0,04	0,7
Pastagem	0,4	0,7
Cana	12,4	4,2
Algodão	26,6	7,2
Culturas agrícolas permanentes		
Café	0,9	1,1
Laranja	0,9	1,1
Banana	0,9	1,1
Culturas anuais (gramíneas)		
Milho	12,0	5,2
Trigo	10,0	--
Culturas anuais (leguminosas)		
Soja	20,1	6,9
Feijão	38,1	11,2

Fonte: Adaptado de Bertoni; Lombardi Neto, 1990.

6.2.5 Sistemas de preparo do solo

A forma de preparo do solo para o cultivo influencia o processo erosivo. Quando são adotados sistemas de preparo intensivos, pode-se provocar um distúrbio maior na estrutura, ocorrendo desagregação das camadas superficiais e compactação subsuperficial, o que facilita a ação erosiva das águas das chuvas (Quadro 18). Outra questão importante é limitar o número de operações ao invés de mudar o tipo de implemento agrícola utilizado. Quando se utiliza um sistema de preparo com arado ou disco, em condições de solo seco, o número de operações de preparo não deve exceder a duas. Operações adicionais não mantêm cobertura de resíduos suficiente para o controle satisfatório da erosão hídrica.

Quadro 18 – Efeito dos sistemas de preparo do solo sobre as perdas de solo e água por erosão; médias na base de 1.300 mm de chuva e declive de 10,8%.

Sistema de preparo	Perdas de	
	Solo	Água
	t ha ⁻¹	% da Chuva
Duas arações	14,6	5,7
Uma aração	12,0	5,5
Escarificação	8,6	5,0

Fonte: Adaptado de Bertoni; Lombardi Neto, 1990.

Quando o cultivo é realizado em solo não revolvido - que possibilita a manutenção de grandes quantidades de resíduos vegetais sobre a superfície do solo - as taxas de perdas de solo por erosão podem ser reduzidas de 90 a 95 %, em comparação ao cultivo realizado em solo desnudo, livre de resíduos.

6.3 FORMAS DE EROÇÃO

A erosão causada pela água em movimento pode apresentar-se das seguintes formas: em entre sulcos, em sulcos e voçorocas (FOSTER, 1982). As três formas de erosão podem ocorrer simultaneamente no mesmo terreno. Essa classificação está dentro dos estádios correspondentes à progressiva concentração de enxurrada na superfície do terreno.

A erosão em entre sulcos é, às vezes, referida como erosão laminar (Figura 55). O processo é tal que finas camadas de solo são removidas da superfície do solo, uma após a outra, e a erosão não é claramente evidenciada por simples inspeção visual. Na erosão entre sulcos, os mecanismos de impacto das gotas da chuva na superfície do solo e o escoamento superficial são, conjuntamente, os responsáveis pelo desprendimento e transporte de sedimentos. É a forma menos notada e, portanto, a mais perigosa. Em estágios avançados, além do abaixamento da superfície do solo, podem-se observar áreas de coloração mais clara, enxurrada de aspecto lodoso, decréscimo da produtividade e, finalmente, afloramentos das raízes das plantas perenes.

Figura 55 – Erosão em entre sulcos no município de Irati, Paraná.



Fonte: Benassi, 2012.

A erosão em sulcos (Figura 56) resulta da concentração do escoamento superficial produzido por uma chuva, ocasionando a formação de pequenos canais que podem ser facilmente desfeitos pelas práticas de cultivo. Foster (1982) caracterizou a erosão em sulcos quando a formação de sulco era com uma profundidade máxima de 300 mm.

Figura 56 – Erosão em sulcos no município de Irati, Paraná.



Fonte: Benassi, 2012.

Nas áreas de ocorrência da erosão em sulcos, predomina a ação erosiva decorrente da energia associada ao escoamento, sendo a energia de impacto das gotas de chuva no desprendimento usualmente considerada desprezível. Além do seu papel no desprendimento de partículas de solo, o escoamento no sulco é também o principal agente de transporte.

As voçorocas (Figura 57) são a forma mais espetacular de erosão, ocasionada por grandes concentrações de enxurrada que passam, ano após ano, no mesmo sulco, que vai se ampliando pelo deslocamento de grandes massas de solo e formando grandes cavidades em extensão e profundidade. São de recuperação muito difícil.

Figura 57 – Voçoroca ativa em uma área de pastagem no município de Palmeira, Paraná.



Fonte: Nicolau, 2009.

6.4 MÉTODOS DE PREVENÇÃO E CONTROLE DA EROSÃO

Existem diversas práticas que podem ser adotadas evitar a ação da erosão nas lavouras. A seguir, serão descritas as mais eficientes para prevenir e controlar esse processo, mas a eficácia das mesmas só ocorrerá quando forem adotadas associadas.

6.4.1 Uso das terras conforme aptidão agrícola

O uso adequado da terra é o primeiro passo em direção à preservação do solo e à agricultura correta e sustentável. Para isso, deve-se empregar cada parcela de terra de acordo com a sua aptidão, capacidade de sustentação e produtividade econômica, de tal forma que os recursos naturais sejam colocados à disposição do homem para seu melhor uso e benefício, ao mesmo tempo em que são preservadas para gerações futuras (RAMALHO FILHO; BEEK, 1995).

Para a definição das classes de aptidão de uso das glebas é importante considerar os seguintes fatores: proximidade dos recursos hídricos, declividade, drenagem, profundidade efetiva, pedregosidade, suscetibilidade à erosão e fertilidade dos solos. A partir destes fatores é possível estabelecer, por exemplo, classes com aptidão: boa, regular ou restrita para culturas agrícolas,

pastagens e reflorestamentos, bem como, definir as áreas de preservação permanente e reserva legal. Fundamentais neste planejamento são: a locação da rede viária e a definição das áreas finais de escoamento das enxurradas (canais vegetados, naturais ou construídos - resistentes à ação erosiva das águas).

6.4.2 Implantação de matas ciliares

O reflorestamento das matas ciliares com espécies nativas é fundamental para restaurar as condições estruturais e funcionais da bacia hidrográfica, tornando-a mais eficiente na preservação e restauração dos processos ecológicos básicos para a sustentabilidade, como os associados à absorção de água pelo solo e à ciclagem de nutrientes.

As matas ciliares elevam a absorção de água, contribuindo para o reabastecimento do solo e do lençol freático, responsável pela regularização e perenização da cadeia hídrica (nascentes, córregos, rios e riachos). Elas retêm as enxurradas que vêm das áreas de efetivo plantio, reduzindo a chegada de solo e de insumos agrícolas aos cursos d'água. Com isto, o assoreamento é menor e a qualidade da água é melhor, devido à manutenção das concentrações de nutrientes dentro de faixas normais (p.ex., causando menor eutrofização) e à menor contaminação das águas com resíduos tóxicos da cadeia alimentar.

6.4.3 Uso de cobertura morta

Cobertura morta é qualquer camada de palha ou restos vegetais dispostos sobre o solo de modo a formar um revestimento na superfície do mesmo. A prática consiste na colocação de 5 a 10 cm de palha ou casca de arroz, capim ou palha seca de milho (Figura 58) e outros materiais como bagaço de cana nas entrelinhas das hortaliças cultivadas em espaçamentos maiores. Sua aplicação é usualmente de 4 a 6 t ha⁻¹.

Figura 58 – Palha de arroz disposta sobre o solo para o plantio de couve-flor.



Fonte: Silva, 2011.

A cobertura morta protege o solo contra o impacto direto das gotas de chuva, faz diminuir o escoamento superficial e incorpora ao solo a matéria orgânica, dificultando a desagregação e o transporte pela água (DERPSCH et al., 1991). Também contribui para a conservação da água, devendo ser preconizada nas zonas de precipitações pouco abundantes, e diminui a temperatura do solo, reduzindo, as perdas por evapotranspiração. Com ela, evita-se o aquecimento excessivo do solo pelos raios solares diretos, propiciando, assim, condições de temperatura e umidade favoráveis à atividade biológica, além de contribuir para incorporar matéria orgânica e nutrientes ao solo e inibir o desenvolvimento de ervas daninhas.

As plantas de cobertura têm a capacidade de reciclar nutrientes, por seu profundo e exuberante sistema radicular que, decomposto, torna o solo leve e poroso, promovendo bom enraizamento do cultivo subsequente, funcionando como um verdadeiro “arado biológico”. Ainda cabe lembrar que as plantas de cobertura podem ser culturas comerciais, portanto, provedoras de renda adicional.

6.4.4 Uso de fertilizantes e corretivos

A manutenção e a restauração sistemática da fertilidade do solo, por meio de corretivos e adubos orgânicos ou minerais, proporcionam melhor desenvolvimento das plantas, portanto, cobertura vegetal do terreno mais rápida e abundante para proteção contra o processo erosivo.

6.4.5 Sistemas conservacionistas de cultivo

Na produção de hortaliças, o sistema de plantio influencia os custos de produção, os aspectos químicos, físicos e biológicos do solo, ciclos de nutrientes e na vida vegetal e dos microrganismos. Como os solos paraenses estão sujeitos a processos de erosão, as práticas de plantio conservacionistas são fundamentais no cultivo de hortaliças. Outra vantagem dessas práticas é o fato de o solo estar sempre preparado para semeadura/plantio, mesmo em períodos chuvosos, que não permitem o revolvimento devido à umidade excessiva.

- **Sistema plantio direto**

O sistema plantio direto é um método de plantio que não envolve preparação do solo, ou seja, apenas é feita uma pequena cova com o propósito único de colocar a semente ou muda na profundidade desejada (DERPSCH et al., 1991) (Figura 58). Nesse caso, a camada de cobertura vegetal é mantida nas entrelinhas e entre plantas.

As hortaliças, em geral, não proporcionam resíduos de palhada em quantidade adequada à manutenção de sistemas de plantio direto. Assim, o mais recomendado é a sucessão de cultivos de hortaliças com plantas de cobertura. A escolha adequada desta sucessão, a ser definida para cada região e realidade socioeconômica, é um dos pontos mais importantes para o sucesso do plantio direto em hortaliças.

O plantio direto também ameniza o microclima, com redução dos extremos de temperatura. A redução na ocorrência de extremos de temperatura, especialmente das

temperaturas máximas, é importante em culturas pouco tolerantes ao calor excessivo, tais como as brássicas.

As espécies plantadas em espaçamento aberto que permitem capinas nas linhas de plantio e roçadas nas entrelinhas, podem ser cultivadas no sistema plantio direto. Neste grupo são incluídas: tomate, pimentão, berinjela, abóbora, abobrinha, moranga, pepino, melão, melancia, repolho, couve-flor, brócolis, couve, feijão-vagem, milho-verde, aipim, batata-doce, morango, entre outras.

No caso do plantio em sistema plantio direto, são necessários alguns ajustes na adubação. Com relação à adubação fosfatada, é possível reduzi-la substancialmente pela localização da adubação de base restrita à cova ou a linha de plantio, além da elevação da capacidade de troca catiônica (CTC), característica relacionada à retenção e disponibilização de nutrientes para as plantas. Por outro lado, com relação à adubação nitrogenada, tem-se observado a necessidade de aumento nas dosagens entre 20% e 50% e, por vezes, de antecipação da primeira adubação, isso quando se trabalha com palha exclusivamente de gramíneas. Quando se trabalha com consórcio ou com cultivo solteiro de leguminosas, há que se calcular o aporte de nitrogênio esperado, reduzindo-o dos níveis a serem aplicados na primeira adubação de cobertura.

▪ **Sistema cultivo mínimo**

Cultivo mínimo é a mínima manipulação do solo necessária para a produção das culturas. Neste sistema também se deixa uma considerável quantidade de cobertura na superfície (resíduos culturais), especialmente nas entrelinhas. O cultivo mínimo de hortaliças é uma prática que pode ser associada ao manejo de plantas espontâneas e plantas de cobertura, especialmente nas espécies em que se utilizam espaçamentos maiores entre linhas tais como na batata-doce e nas espécies pertencentes às famílias das cucurbitáceas, brássicas e solanáceas. Nesse caso, são abertos pequenos sulcos que são adubados para posterior semeadura ou transplante de mudas, deixando-se nas entrelinhas as plantas espontâneas ou plantas de cobertura. Posteriormente, por ocasião da primeira adubação de cobertura, em algumas espécies, é feita a amontoa e, quando necessário são feitas roçadas nas entrelinhas e arranquio das plantas espontâneas na linha para evitar a competição por luz, nutrientes e água.

6.4.6 Rotação de culturas

A rotação de culturas é o cultivo alternado de diferentes espécies vegetais no mesmo local e na mesma estação do ano, seguindo-se um plano predefinido, de acordo com princípios básicos (SILVA, 2011; ALTIERI et al., 2003). A rotação, se utilizada de forma correta, é um investimento no solo, resultando em benefícios tanto no rendimento como na qualidade das hortaliças, além de equilibrar a fertilidade do solo e reduzir pragas, doenças e plantas espontâneas.

Segundo Silva (2011), Os princípios **básicos da rotação de culturas são:**

- não cultivar, no mesmo lugar, espécies da mesma família botânica, pois essas estão sujeitas às mesmas pragas, doenças e plantas espontâneas. É o princípio de “matar de fome” os insetos, os fungos e as bactérias que atacam as plantas cultivadas;
- ao utilizar espécies de famílias botânicas diferentes na rotação de culturas, deve-se alternar culturas com diferentes exigências nutricionais e com diferentes sistemas radiculares.

Dentre as famílias botânicas, as solanáceas (batata, tomate, pimentão, berinjela) possuem maiores problemas de doenças e pragas, seguidas pelas cucurbitáceas (melancia, melão, abóbora, abobrinha, chuchu, pepino), brássicas (repolho, couve-flor, brócolis, rabanete) e liliáceas (alho, cebola). Estas espécies não devem ser cultivadas na mesma área e estação do ano (SILVA, 2011).

A rotação de culturas promove redução e/ou eliminação de doenças, pragas e plantas espontâneas; aumento da produtividade e melhoria da qualidade, com redução de custos; manutenção e/ou melhoria da fertilidade e propriedades físicas do solo; redução das perdas por erosão; diversificação de renda da propriedade; melhor aproveitamento dos fatores de produção (terra, capital e mão-de-obra).

Segundo Silva (2011), a seleção das melhores espécies para rotação depende do problema que se deseja controlar e da adaptação às condições de clima e solo. As gramíneas, denominadas atualmente de poáceas e, as leguminosas são as mais indicadas. A família das poáceas (anteriormente denominada de gramíneas), tais como milho, aveia, cana-de-açúcar, pastagens e outras espécies, são as mais indicadas para rotação com hortaliças, pois são mais resistentes às pragas e doenças, desfavorecem o desenvolvimento de algumas bactérias e fungos (rizosfera antagônica) e inibem as plantas espontâneas. As leguminosas, como a mucuna, são ótimas opções para rotação por possuírem grande capacidade de melhorar e cobrir o solo, reduzindo as plantas espontâneas, fixando o nitrogênio do ar e reciclando nutrientes do solo devido ao sistema radicular profundo, além de controlar a doença fusariose. As leguminosas (crotalária e mucuna) são hospedeiras de nematoides. As leguminosas possuem efeito supressor e/ou alelopático a diversas plantas espontâneas (tiririca, picão preto e branco, capim carrapicho e capim paulista). Uma ótima opção de rotação de culturas no verão é o consórcio milho-verde e mucuna. Uma ótima alternativa para rotação de culturas no inverno é o consórcio de aveia, ervilhaca e nabo forrageiro.

6.4.7 Consorciação de culturas

Entende-se por consorciação de culturas, o cultivo de duas ou mais espécies com diferentes ciclos e arquiteturas vegetativas, exploradas concomitantemente na mesma área e num mesmo período de tempo, sendo que não necessariamente tenham sido semeadas ao mesmo tempo (REZENDE et al., 2005; SILVA, 2011).

O sistema consorciado, em função das vantagens proporcionadas aos agricultores, pode constituir-se numa tecnologia bastante aplicável e acessível, vindo a estabelecer-se como um sistema alternativo de cultivo, possibilitando um maior ganho, seja pelo efeito sinérgico ou compensatório de uma cultura sobre a outra, como também pelo menor impacto ambiental proporcionado, em relação à monocultura (REZENDE et al., 2003; SILVA, 2011).

O manejo de sistemas consorciados consiste basicamente no desenho de combinações espaciais e temporais de culturas em uma área. O arranjo das culturas no espaço pode ser feito na forma de sistemas tais como cultivo em faixas, cultivos mistos (sem arranjo definido em fileiras), parcelas em mosaico, cultivos em linhas alternadas e culturas de cobertura (ALTIERI et al., 2003).

De acordo com Altieri et al. (2003), algumas das características das culturas a serem consideradas para os sistemas consorciados incluem resposta a qualquer duração de fotoperíodo, maturação precoce e uniforme, baixa estatura, resistência a insetos e patógenos, resposta eficiente à fertilidade do solo e alto potencial produtivo. Em um sistema de consorciação, a competição entre plantas é maior pela luminosidade do que por água e nutrientes (Portes, 1984; SILVA, 2011). O melhor resultado observado em cultivo consorciado pode conferir às espécies avaliadas a condição de plantas companheiras. Tal condição é denominada por Ceretta (1986) de cooperação mútua, na qual se tem um efeito benéfico entre as espécies e uma utilização máxima dos fatores de produção do meio.

O consórcio de adubos verdes (aveia – 60 kg/ha + ervilhaca – 18 kg/ha + nabo forrageiro – 4 kg/ha) é uma ótima opção para melhorar a cobertura do solo, promover o efeito benéfico no manejo de plantas espontâneas, aprimorar a eficiência na ciclagem de nutrientes (fornecendo nitrogênio e reciclando nutrientes) e na descompactação do solo e ainda permitir o cultivo mínimo de hortaliças (Figura 59) (SILVA, 2011).

Figura 59 – Cultivo mínimo de tomate tutorado e milho-verde em cobertura de aveia + ervilhaca + nabo forrageiro.



Fonte: Silva, 2011.

6.4.8 Cultivo em nível

Uma das formas de controle da erosão é a construção de canteiros em nível, com terraceamento ou não dependendo do declive e do tipo de solo (Figura 60). Numa área cultivada em nível, como as operações são feitas praticamente em nível, cada fileira de plantas, assim como pequenos sulcos, leiras e restos culturais deixados na superfície são dispostos de maneira que forma barreiras que dificultam o percurso livre da enxurrada, diminuindo sua velocidade e sua energia, aumentando, conseqüentemente, a infiltração da água no solo.

Figura 60 – Canteiros construídos em nível prontos para o plantio de cenoura.



Fonte: Trani et al., 2010.

6.4.9 Terraceamento

O terraceamento baseia-se no parcelamento das rampas, e consiste na construção de terraços (Figura 61) no sentido transversal à declividade do terreno, formando obstáculos físicos capazes de reduzir a velocidade do escoamento, e disciplinarem o movimento da água sobre a superfície do terreno (PRUSKI, 2006).

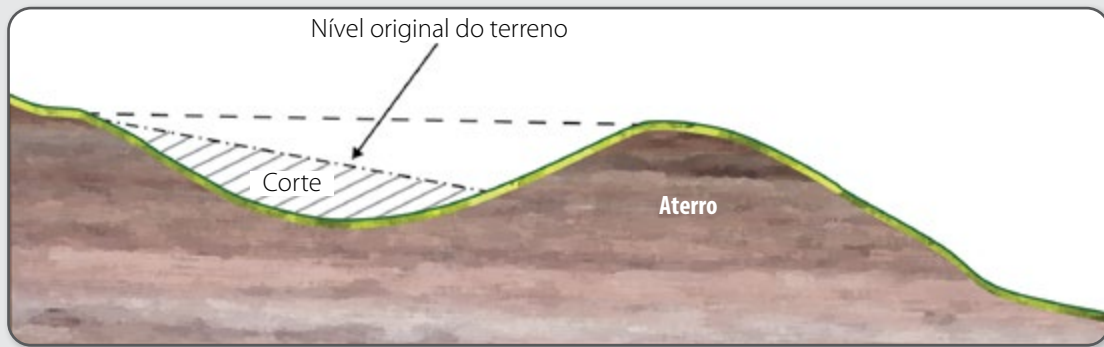
Figura 61 – Representação esquemática de uma área terraceada mostrando o parcelamento da rampa e a retenção das águas da enxurrada.



Fonte: Pruski; 2006.

Terraço é um conjunto formado pela combinação de um canal (valeta) e de um camalhão (monte de terra ou dique) (Figura 62), construído a intervalos dimensionados, no sentido transversal ao declive, ou seja, construídos em nível ou com pequeno gradiente (PRUSKI, 2006).

Figura 62 – Partes componentes de um terraço.



Fonte: Pruski; 2006.

Os terraços têm a finalidade de reter e infiltrar, ou escoar lentamente as águas provenientes da parcela do lançante imediatamente superior, de forma a minimizar o poder erosivo das enxurradas cortando o declive. O terraço permite a contenção de enxurradas, forçando a absorção da água da chuva pelo solo, ou a drenagem lenta e segura do excesso de água (PRUSKI, 2006).

Cada terraço protege a faixa que está logo abaixo dele, ao receber as águas da faixa que está acima (Figuras 63). O terraço pode reduzir as perdas de solo em até 70-80%, e de água em até 100%, desde que seja criteriosamente planejado (tipo, dimensionamento), executado (locado, construído) e conservado (limpos, reforçados). Embora apresente custo elevado (e que aumenta com a declividade), esta prática é necessária em muitas áreas agrícolas onde técnicas mais simples (como o plantio em nível, as culturas em faixas ou a rotação de culturas), por si só, não são suficientes para uma eficaz proteção do solo contra a erosão hídrica (PRUSKI, 2006).

Figura 63 – Vista parcial da água da enxurrada retida em um terraço.



Fonte: NRCS, 2011b.

Nem todos os solos e declives podem ser terraceados com êxito. Nos solos pedregosos ou muito rasos, com subsolo adensado, é muito caro e difícil de manter um sistema de terraceamento. As dificuldades de construção e manutenção aumentam à medida que cresce a declividade do terreno. **O uso do terraceamento é recomendado para declives superiores a 3%, comprimentos de rampa maiores que 100 metros e topografia regular.**

A eficiência do sistema de terraceamento depende, também, da combinação de outras práticas complementares, como plantio em nível, rotação de culturas, controle das queimadas e manutenção de cobertura morta na superfície do solo. O custo de construção e manutenção de um sistema de terraceamento é relativamente alto. Por esta razão, antes de adoção dessa tecnologia deve-se fazer um estudo criterioso das condições locais, como clima, solo, sistema de cultivo, culturas a serem implantadas, relevo do terreno e equipamento disponível, para que se tenham segurança e eficiência no controle da erosão. Após vários anos, seu efeito se pode notar nas melhores produções das culturas, devido à conservação do solo e da água (PRUSKI, 2006).

7 COMPACTAÇÃO DOS SOLOS

A compactação é a consolidação física do solo pela aplicação de uma carga (força) que destrói a estrutura do solo, reduz a porosidade, limita a infiltração de água e ar, aumenta a resistência à penetração das raízes e, frequentemente, promove a redução do rendimento das culturas. A maior parte dos agricultores está ciente do problema da compactação do solo, mas sua importância é, muitas vezes, subestimada.

Os efeitos da compactação na produtividade das culturas podem ser um fator significativo na economia agrícola de hoje. Solos compactados podem ter queda do rendimento das colheitas de até 50% devido à redução da aeração, aumento da resistência do solo à penetração das raízes, à má drenagem interna e à disponibilidade limitada de nutrientes para as plantas.

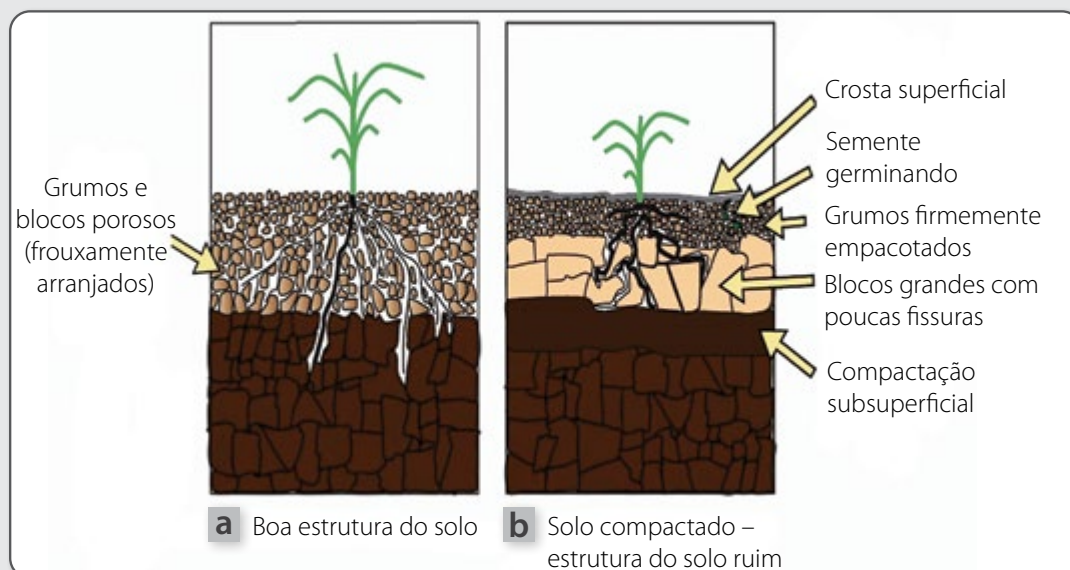
As mudanças recentes nas práticas agrícolas (como aumento do número de operações e tamanho de máquinas) tem favorecido a compactação do solo. A compactação mais limitante ao rendimento das culturas é causada pelo tráfego de equipamentos pesados, principalmente quando as operações são conduzidas em solos úmidos. A compactação também pode ser causada pelo pisoteio de animais.

7.1 CAUSAS DA COMPACTAÇÃO

A compactação é um processo que ocorre, inicialmente, quando as pressões exercidas pelo rodado dos pneus das máquinas agrícolas que circulam sobre o solo comprimem e aproximam os agregados ou as partículas individuais. O resultado é um solo denso, com poucos macroporos, com má drenagem interna e aeração limitada.

A compactação do solo tem várias causas e diferentes efeitos visíveis. A compactação pode ocorrer tanto na superfície como próximo da superfície do solo (*compactação superficial*, que inclui a formação de crostas superficiais, bem como o “pé-de-arado” ou o “pé-de-grade”), ou em maiores profundidades (*compactação subsuperficial*) (Figura 64).

Figura 64 – Plantas crescendo em (a) solo com estrutura adequada para o cultivo e em (b) solo com os três tipos de compactação.



Fonte: adaptado de Magdoff; Van Es, 2009.

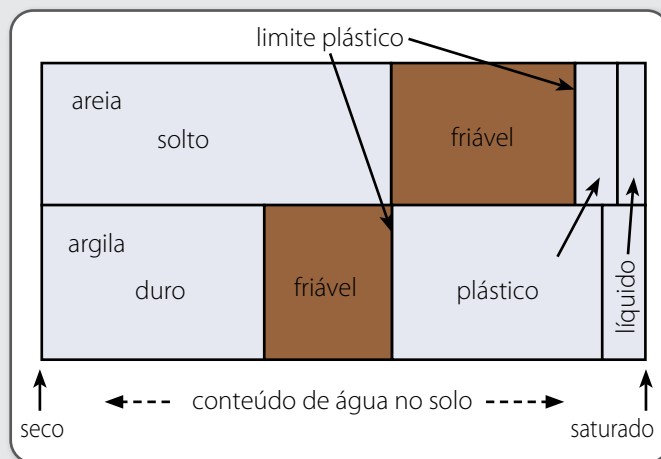
7.1.1 Compactação superficial

A compactação da camada arável ocorre nos solos agrícolas intensamente trabalhados. Resulta da perda de agregação do solo, que ocorre, normalmente, em função de três fatores: 1) erosão; 2) redução dos níveis de matéria orgânica; e, 3) pressão exercida pelo peso dos equipamentos de campo. Os dois primeiros fatores são consequência de fornecimento reduzido de materiais agregantes (gomas) e uma subsequente perda de agregação.

As crostas superficiais ocorrem quando a superfície do solo está desprotegida e a energia das gotas de chuva dispersa os agregados úmidos, pulverizando-os, de modo que as partículas do solo formam uma fina camada superficial densa, que, quando seca, forma uma crosta dura. Quando o encrostamento ocorre logo após o plantio, pode atrasar ou impedir a emergência das plântulas. Mesmo quando o encrostamento não é severo o suficiente para limitar a germinação, este pode reduzir a infiltração de água. Solos com crostas superficiais são propensas a taxas muito elevadas de escoamento superficial e erosão.

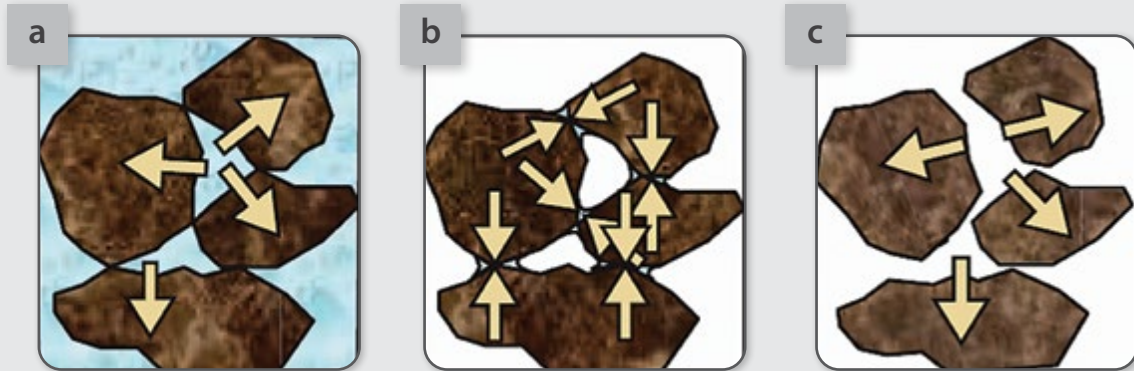
A compactação dos solos resultante do tráfego de equipamentos e implementos agrícolas pesados é, especialmente, prejudicial quando os solos estão úmidos. Essa combinação de fatores é a causa principal da compactação subsuperficial e uma das causas da compactação da camada arável. Para entender isso, precisamos saber um pouco sobre a consistência do solo, ou como o solo reage a forças externas. Com conteúdos muito elevados de água, um solo pode se comportar como um líquido (Figura 65), uma vez que apresenta pouca coesão interna entre as partículas (Figura 66A, à esquerda). Em uma rampa declivosa, ele pode simplesmente fluir em função da força da gravidade, como ocorre nos deslizamentos de terra durante os períodos muito úmidos. Em conteúdos de água mais reduzidos, o solo apresenta um pouco mais de coesão (figura 66B, meio), mas ainda pode ser facilmente moldado e diz-se estar plástico (figura 65). Ao continuar a secagem, o solo ficará friável e se quebrará em vez de se moldar sob pressão (Figura 65).

Figura 65 – Estados de consistência do solo para solo arenoso e solo argiloso (o solo friável é o melhor para o cultivo).



Fonte: Adaptado de Magdoff; Van Es, 2009.

Figura 66 – Nos solos saturados, a água presente nos poros afasta as partículas do solo (A). Os solos úmidos são firmes ou duros em função da aproximação das partículas promovida pela superfície curva da água que se forma nos pontos de contato (B). No solo seco as partículas ficam soltas, devido à falta de coesão (C).



Fonte: Adaptado de Magdoff; Van Es, 2009.

O ponto entre a condição de solo plástico e friável – o chamado **limite de plasticidade** – possui implicações agrícolas importantes. Quando um solo está mais úmido do que o limite de plasticidade, pode ser compactado severamente quando mobilizado ou trafegado, porque os agregados do solo são comprimidos, e se forma uma massa densa e lubrificada. Essa compactação pode ser comprovada quando se vêem torrões grandes e brilhantes ou sulcos profundos de pneus em um campo. Quando o solo está friável (conteúdo de água abaixo do limite plástico), o mesmo se desintegra, quando cultivado, e os agregados resistem à compactação pelo tráfego de máquinas e implementos agrícolas. Assim, a suscetibilidade à compactação é influenciada pelo momento em que ocorrem as operações de campo, o qual está relacionado com as condições de umidade do solo.

A consistência de um solo é influenciada pela sua textura (figura 65). Por exemplo: solos arenosos de textura grossa drenam rapidamente e, por sua vez, mudam rapidamente de plástico para friável. Solos francos e argilosos precisam de períodos de secagem mais longos para perderem água em quantidade suficiente para se tornarem friáveis. Este tempo extra de secagem pode causar atrasos na programação das operações de campo.

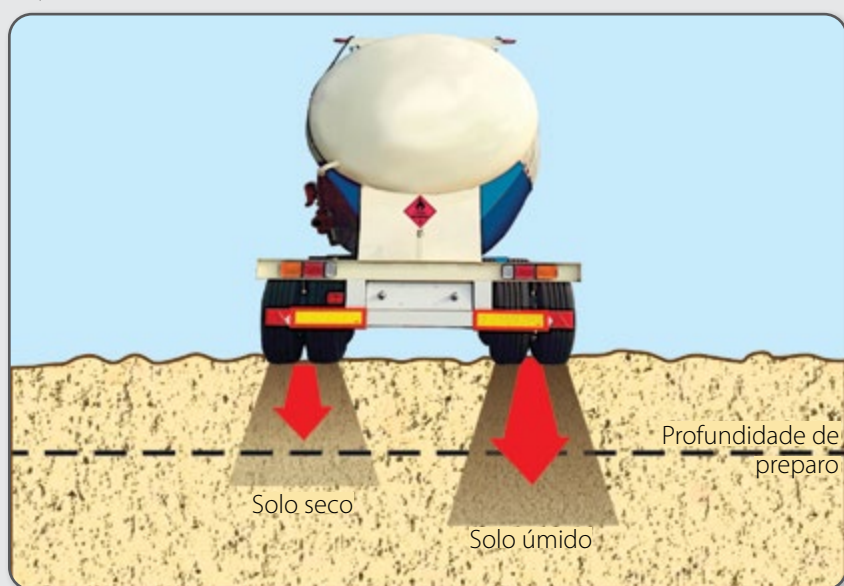
7.1.2 Compactação subsuperficial

O solo compactado abaixo da camada cultivada (camada arável) é, geralmente, chamado de “pé-de-arado”, embora não seja causado apenas pela ação do arado. O subsolo é facilmente compactado porque geralmente é mais úmido, mais denso, apresenta maior teor de argila, menor teor de matéria orgânica e é menos agregado do que o horizonte superficial. Além disso, o subsolo não é desagregado pelo preparo regular e não pode ser facilmente alterado com adições de materiais orgânicos, de modo que a compactação no subsolo é mais difícil de manejar.

A compactação subsuperficial resulta da aplicação de cargas diretamente sobre a superfície do solo ou da transferência de forças de compactação da superfície para as camadas mais profundas. A compactação subsuperficial ocorre quando os agricultores trafegam com veículos pesados que apresentem má distribuição de carga (peso).

A carga exercida sobre a superfície é transferida solo adentro em uma forma padrão do tipo cone (figura 67). Com o aumento da profundidade, a força de compactação é distribuída por uma área maior, reduzindo, assim, a pressão nas camadas mais profundas. Quando a força aplicada na superfície é pequena - por exemplo, por meio do pé ou pelo casco de animais - a pressão exercida abaixo da camada arável é mínima. Mas, quando a carga aplicada por equipamentos pesados é muito elevada, as pressões em profundidade são suficientes para causar considerável compactação do solo. Quando o solo está úmido, a força que causa a compactação próxima da superfície é mais facilmente transferida para o subsolo. Fica claro que a degradação severa dos solos pela compactação ocorre com a combinação de tráfego de veículos pesados e condições do solo úmido.

Figure 67 – Forças aplicadas por cargas pesadas durante o preparo do solo são transferidas para maiores profundidades no solo, principalmente quando solo está úmido.



Fonte: Adaptado de Magdoff; Van Es, 2009.

Também podem ser aplicadas cargas diretas sobre o solo pela pressão de implementos de preparo, especialmente por arados ou discos, que pressionam o solo para baixo. Os arados causam compactação porque o peso do arado somado ao peso das leivas levantadas dos sulcos resulta em grandes forças descendentes. Os discos têm a maior parte do seu peso concentrado na parte inferior do mesmo e, por esse motivo, criam os pans. A compactação subsuperficial também pode ocorrer durante a aração com aiveca, quando um conjunto de rodas de tração é colocado no sulco aberto, de modo que se aplica a pressão da roda diretamente no solo abaixo da camada arada.

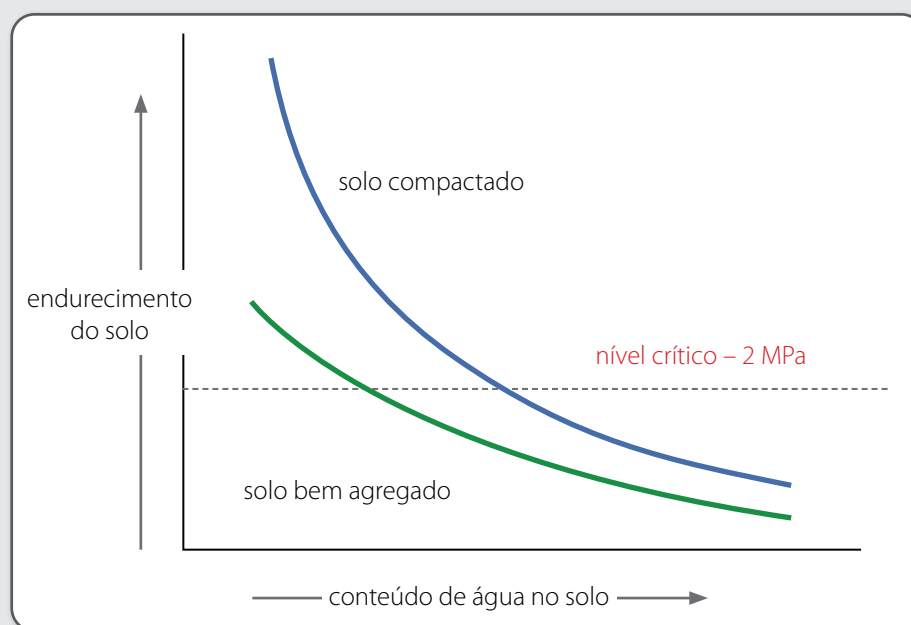
7.2 CONSEQUÊNCIAS DA COMPACTAÇÃO

Como a compactação pressiona o solo e promove aproximação das partículas, o solo torna-se denso e o espaço poroso é perdido. Os poros maiores são eliminados. A perda da agregação a partir a compactação é prejudicial, principalmente, para os solos de textura fina e média, que

dependem dos macroporos para que ocorram boa infiltração e percolação da água, bem como para a troca de gases com a atmosfera. Embora a compactação também possa danificar os solos de textura grossa, o impacto é menos grave. Estes solos dependem menos da agregação, porque os poros entre as partículas individuais são suficientemente grandes para permitir uma boa circulação do ar e da água.

Um solo compactado torna-se duro ao secar, porque contém muitos poros pequenos que podem armazenar água em altas sucções e tencionam firmemente as partículas. Isso pode restringir o crescimento das raízes e a atividade dos organismos do solo. Os solos compactados apresentam, normalmente, maior resistência à penetração em um determinado nível de umidade do solo do que um solo bem estruturado (Figura 68), que tem grandes poros entre agregados e que, portanto, podem ser facilmente separados. A resistência à penetração de um solo úmido e de boa qualidade estrutural geralmente se apresenta bem abaixo do nível crítico, onde o crescimento da raiz cessa para a maioria das culturas – 2 MPa (Figura 68).

Figure 68 – Durante o secamento, os solos compactados endurecem mais rapidamente do que os solos bem agregados.



Fonte: Adaptado de Magdoff; Van Es, 2009.

Quanto o solo seca, a sua resistência aumenta, mas em um solo de boa qualidade não excede o nível crítico para a maior parte (ou a totalidade) do intervalo de umidade. Um solo compactado, por outro lado, apresenta uma faixa muito estreita de conteúdo de água para o crescimento adequado das raízes (Figura 68). O solo apresenta aumento da resistência à penetração, mesmo na faixa úmida (o solo fica duro). Quando seca, um solo compactado endurece mais rápido do que um solo bem estruturado, tornando-se rapidamente tão resistente que alcança níveis bem acima do nível crítico de 2 MPa que restringe o crescimento das raízes.

As raízes que estão crescendo precisam de poros grandes com diâmetros superiores a 0,1 mm, tamanho da maior parte das extremidades das raízes. As raízes devem entrar no poro e

ancorar-se, antes de continuar o crescimento. Solos compactados que não têm ou têm poucos poros grandes não permitem que as plantas enraízem de modo eficiente, limitando, assim, o consumo de água e de nutrientes.

O que acontece quando o crescimento das raízes é limitado? O sistema radicular irá desenvolver raízes curtas e grossas, e poucas raízes finas ou pelos radiculares (Figura 64). As poucas raízes grossas podem ser capazes de encontrar algumas zonas de fraqueza no solo, muitas vezes seguindo padrões tortuosos de crescimento. Essas raízes contêm tecidos espessos e não são eficientes para absorver água e nutrientes. Em muitos casos, as raízes não crescem abaixo da camada arada em direção ao subsolo (Figura 64). A penetração mais profunda de raízes é crítica, principalmente, na agricultura de sequeiro. A limitação do crescimento radicular profundo pela compactação do subsolo reduz o volume de solo a partir do qual as raízes das plantas podem extrair água e aumenta a probabilidade de perdas na produção quando ocorre estresse hídrico.

Além do volume reduzido de solo para as raízes explorarem também ocorre mais um efeito direto sobre o crescimento da planta. Um sistema radicular que encontra barreiras mecânicas envia um sinal hormonal para a parte aérea da planta, que, em seguida, diminui a respiração e o crescimento. Esta resposta da planta parece ser um mecanismo natural de sobrevivência, semelhante ao que ocorre quando as plantas passaram por estresse hídrico. Como os mesmos hormônios estão envolvidos – e também aumenta a resistência mecânica quando o solo seca –, é difícil separar o efeito da compactação daqueles decorrentes do estresse hídrico.

7.3 MONITORAMENTO E AVALIAÇÃO DA COMPACTAÇÃO

Atualmente, a compactação do solo é um assunto bastante debatido, mas exige acompanhamento adequado, para que se tenha um diagnóstico e o dimensionamento de sua real importância.

Inicialmente, deve-se organizar a propriedade por glebas de cultivo. Após análise das tendências de produtividade e caracterizado o decréscimo de produtividade, verificar se o mesmo não foi causado por problemas climáticos, pragas e/ou doenças, deficiências de nutrientes, acidez do solo, exigências termo-fotoperiódicas das cultivares, além de outras. Excluídas essas possibilidades, a melhor maneira de se verificar o efeito da compactação sobre o desenvolvimento das plantas é através de um diagnóstico que deve ser relacionado aos dados de resistência do solo (profundidade, intensidade e umidade), obtidos com auxílio de um penetrômetro.

Os penetrômetros convencionais são constituídos de uma haste com um cone na extremidade inferior e um dinamômetro, na superior (Figura 69). À medida que o operador força o conjunto contra o solo, a resistência do solo à penetração é registrada no dinamômetro (TORRES; SARAIVA, 1999).

Figura 69 – Exemplo de um penetrômetro de campo.



Fonte: Wikimedia Commons, 2010.

A resistência do solo ao penetrômetro é um índice integrado pela compactação do solo, conteúdo de umidade, textura, tipo de argila e dos outros minerais que constituem o solo. Portanto, é uma determinação muito relacionada com o estado de consistência e estrutura do solo. As medidas para avaliar o impedimento mecânico no solo são assumidas como sendo a quantidade de pressão que os penetrômetros exercem ao penetrarem através do solo. Os resultados normalmente são expressos em kgf/cm^2 , kPa ou MPa.

Algumas dificuldades têm sido observadas no uso dos penetrômetros. A principal delas é quando se quer definir um nível crítico de resistência à penetração do solo, a partir do qual ocorrem danos ao desenvolvimento radicular ou à produtividade das culturas, ou seja, definir, em termos absolutos, se um determinado solo está ou não compactado. Isso ocorre, porque as leituras com penetrômetro estão relacionadas com a variação dos teores de umidade do solo e por causa da complexidade das interações envolvidas na definição do nível crítico de um parâmetro físico do solo. Nesse caso, tem-se sugerido utilizar os valores de resistências à penetração abaixo de 2,0 MPa

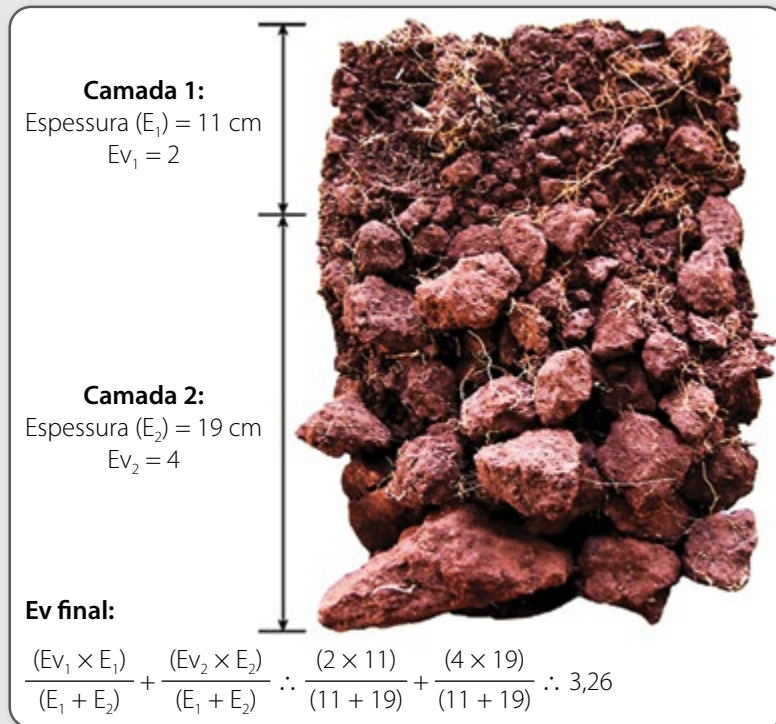
como um indicativo baixo de compactação, quando o solo estiver na umidade friável. Os valores acima de 2,5 MPa são elevados e, se constatada queda de produtividade, sugerem que o diagnóstico deve ser complementado com a abertura de trincheira para a avaliação da estrutura do solo e da distribuição do sistema radicular.

Em alguns modelos de penetrômetros, o operador involuntariamente, pode variar a força aplicada sobre o aparelho e, com isso, alterar a velocidade de inserção da haste no solo e, por consequência, os resultados. Quanto maior for a velocidade de inserção, menor será a resistência registrada. Esse problema tende a se agravar quando o solo torna-se mais seco e o operador tem dificuldade em fazer todas as medições com a velocidade constante. Os penetrômetros de velocidade constante tendem a contornar esse problema.

Para o monitoramento da compactação do solo, é importante que a propriedade seja dividida em glebas individualizadas pelo histórico do manejo da área e atributos do solo. As leituras com penetrômetro serão importantes para definir as glebas com maiores problemas. Para isso, deve-se procurar fazer o maior número possível de leituras (subamostras). Aconselha-se que o número mínimo seja em torno de 10 a 15 subamostras por gleba. As avaliações, preferencialmente, devem ser feitas quando o solo estiver no estado de consistência friável. Para efeito de comparação entre as glebas, ou caso se tenha informações sobre a relação da resistência à penetração e densidade do solo, em função da umidade do solo, e se queira ter ideia indiretamente da densidade do solo, através da resistência solo, é importante que se determine a umidade durante as avaliações. A umidade do solo pode ser avaliada pelo método gravimétrico, com os resultados sendo expressos em porcentagem (%). É importante que se isole a influência do operador durante as medições com os penetrômetros, principalmente aquela relacionada com a velocidade de inserção do cone no solo que deve ser constante em todas as medidas.

A avaliação da qualidade estrutural do solo também vem sendo utilizada com sucesso para monitorar a compactação do solo. A qualidade estrutural do solo pode ser avaliada por meio de avaliações visuais, realizadas e concluídas diretamente no campo. Esta avaliação é realizada em pequenas trincheiras abertas nas glebas de cultivo. O método denominado Avaliação Visual da Qualidade da Estrutura do Solo (BALL et al., 2007) tem sido empregado no Paraná (GIAROLA et al., 2009) com esta finalidade. Esse método consiste em abrir mini trincheiras com 0,30 m de largura x 0,40 m de comprimento x 0,30 m de profundidade, com o auxílio de uma pá reta, para a extração de amostras indeformadas (blocos) com 0,15 m de largura x 0,25 m de profundidade x 0,10 m de espessura da camada superficial do solo de cada gleba a ser avaliada. Sugere-se que sejam retiradas, pelo menos, 10 amostras de cada gleba homogênea. A avaliação da estrutura se apoia na aparência, resistência e características das unidades estruturais de blocos de solo, sendo definida por cinco escores visuais (Ev) para a classificação da qualidade: de Ev=1 (melhor qualidade estrutural) a Ev=5 (pior qualidade estrutural). A figura 70 exemplifica a atribuição de escores e o cálculo do escore final conforme a chave de classificação de Ball et al. (2007).

Figura 70 – Exemplo da aplicação da metodologia para obtenção do escore visual (Ev) pelo método de Ball et al. (2007).



Fonte: Giarola et a., 2009.

A análise visual é complementada pela observação das raízes, poros e atividade biológica. As estruturas compactadas apresentam pouca quantidade de raízes no seu interior, baixa atividade biológica e ausência quase que completa de orifícios e porosidade. Além disso, as estruturas compactadas, ao serem quebradas, evidenciam faces de rupturas lisas, ao contrário das não compactadas que apresentam superfície rugosa, com os torrões apresentando distribuição de agregados arredondados que possibilitam visualização de porosidade e fissuras, e o desenvolvimento radicular bastante ramificado e em forma não achatada (BALL et al., 2007).

7.4 MÉTODOS DE PREVENÇÃO E CONTROLE DA COMPACTAÇÃO

A escolha dos tratores adequados e a correta regulagem máquinas e operações pode minimizar o efeito da compactação, mas a melhoria do manejo é a melhor solução para lidar com esse problema.

Gerenciar as operações de campo

- Evite realizar operações de campo em solos úmidos;
- Limite a carga do veículo para garantir ponderação adequada em operações de preparo do solo;
- Gerencie o tráfego de veículos dentro das lavouras. Sistemas de cultivo com tráfego controlado, especialmente aqueles que mantêm resíduo da colheita na superfície, servirão para limitar a compactação e reduzir a erosão do solo.

Resolver os problemas de drenagem

- Adicionar materiais organizadores para ajudar a construir a estrutura do solo e aumentar a resistência do solo.
- Rotacionar com gramíneas para criar canais no solo que as culturas subsequentes podem usar.

Eliminar a compactação existente

- Use preparo convencional para remover a compactação na camada arável.
- Subsolagem pode ser necessária para aliviar a compactação profunda. O preparo profundo não deve ser uma prática anual, devido ao seu potencial para destruir a estrutura do solo, trazer solo infértil e pedras para a superfície, e pode não ser rentável.

8 SALINIZAÇÃO DOS SOLOS

8.1 DEFINIÇÃO, MECANISMOS E IMPACTOS

A salinização do solo ou do ambiente radicular onde as plantas estão crescendo acontece quando a concentração de sais que contêm os íons potássio (K^+), magnésio (Mg^{2+}), cálcio (Ca^{2+}), cloreto (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}), carbonato (CO_3^{2-}), bicarbonato (HCO_3^-) e sódio (Na^+) se encontra em níveis bastante elevados. A salinização do solo afeta a germinação e a densidade das culturas, bem como seu desenvolvimento vegetativo, reduzindo sua produtividade e, nos casos mais sérios, levando à morte generalizada das plantas (RIBEIRO et al., 2009). De acordo com a classificação do "U.S. Salinity Laboratory" solos salinos são os que possuem pH inferior a 8,5, condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes) superior a 4 dS m^{-1} e porcentagem de sódio trocável (PST) inferior a 15% (DAKER, 1988).

Existem dois tipos de salinização: a primária (ou inerente) e a secundária. A salinização primária provém da acumulação de sais por **processos naturais**, devido a uma elevação no teor de sais nos materiais de origem ou nas águas subterrâneas, por exemplo, salinas, lagos de sal, pântanos ou marés de sal. Já a salinização secundária é causada por **atividades humanas** como práticas de irrigação inadequadas com águas de elevado teor de sais e/ou acompanhadas de uma drenagem insuficiente; utilização de fertilizantes e outros fatores de produção, principalmente na agricultura intensiva, em terrenos com baixa permeabilidade e possibilidades de lixiviação reduzidas; irrigação com águas residuais de elevado teor de sais; eliminação através dos solos de águas residuais de elevado teor de sais.

8.2 MÉTODOS DE PREVENÇÃO E CONTROLE DA SALINIZAÇÃO

O requerimento básico para a prevenção e controle da salinidade nas áreas irrigadas é a existência da percolação e da drenagem natural ou artificial, garantindo o fluxo da água e do sal para baixo da zona radicular das culturas. A água usada na irrigação deve ser suficiente para que os sais não permaneçam na zona radicular e sejam lixiviados.

Devem-se evitar fertilizantes de alto nível salino e em altas concentrações, e é necessário que a fertirrigação seja conduzida de maneira correta e racional. Para controlar o processo de salinização em solos rasos ou compactados, como a capacidade de armazenamento desses solos é geralmente pequena, a irrigação deve ser leve e o turno de rega menor. Deve haver a lavagem ou exigência de lixiviação, a qual promove um fluxo permanente de sais através do perfil do solo, reduzindo a alta salinidade inicial até níveis aceitáveis pelas culturas.

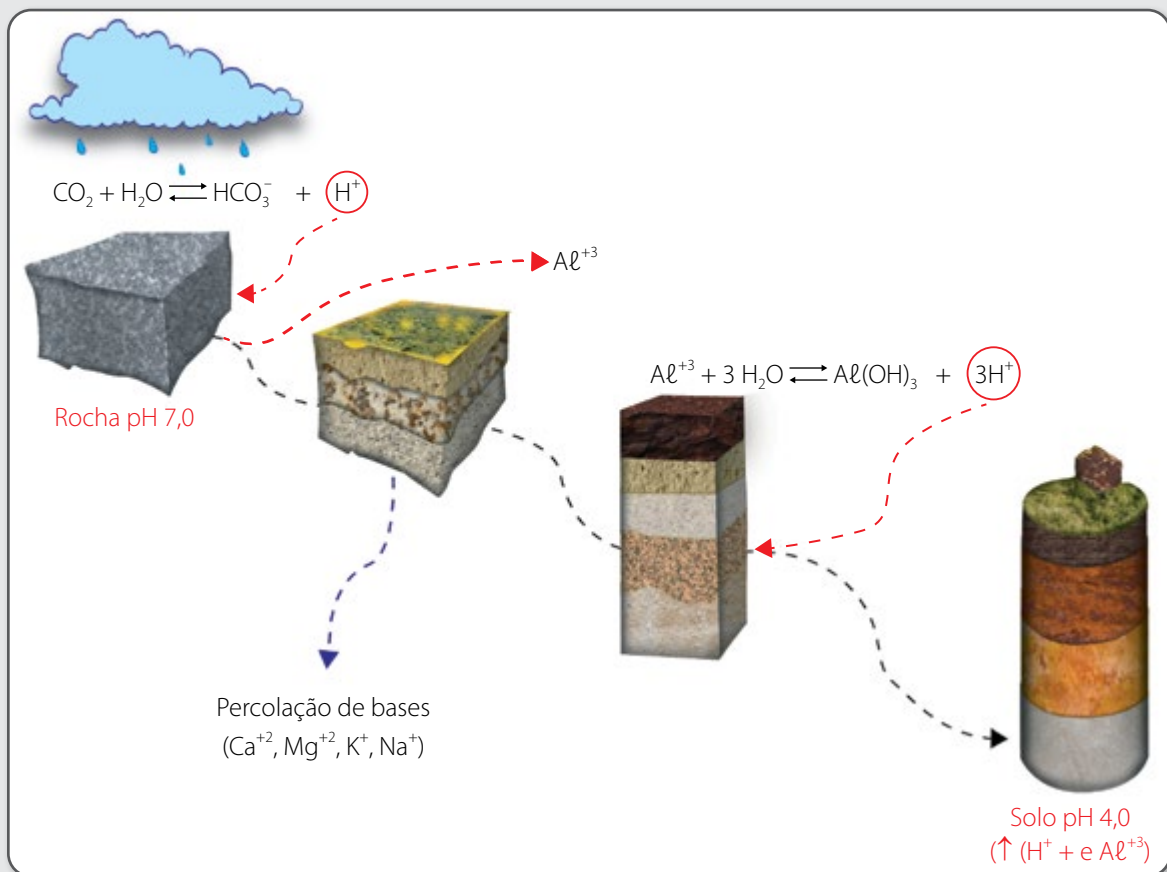
Um processo de drenagem se faz necessário para viabilizar a lavagem e aumentar a aeração. No manejo, podem-se considerar a aração profunda a qual pode romper estruturas do solo e formar torrões e a subsolagem cujo método quebra camadas de solo em profundidade. Outro método que pode ajudar no controle é a rotação de culturas, a qual inclui plantas com tolerância à salinidade e que extraem maior quantidade de sais do solo.

9 ACIDIFICAÇÃO DOS SOLOS

9.1 DEFINIÇÃO, MECANISMOS E IMPACTOS

Muitos solos, especialmente de regiões úmidas, podem ser ácidos, ou seja, apresentam pH baixo, mesmo sem terem sido cultivados. Esses solos podem ser ácidos devido à rocha matriz ou a processos de formação que favorecem a remoção de bases como potássio, cálcio e magnésio (Figura 71). A lixiviação das bases e os ácidos produzidos nesses solos durante a decomposição da matéria orgânica os tornaram naturalmente ácidos. Quando os solos passam a ser cultivados, a matéria orgânica é decomposta (mineralizada) mais rapidamente e mais ácidos são formados. Além disso, os fertilizantes nitrogenados comumente utilizados na agricultura (fertilizantes amoniacais e ureia) também são ácidos.

Figura 71 – Origem da acidez dos solos de regiões úmidas.



Fonte: Adaptado de Toledo et al., 2000.

As plantas evoluíram em ambientes específicos, que por sua vez influenciaram as suas necessidades como culturas agrícolas. Por exemplo, a alfafa é proveniente de uma região semiárida, onde o pH do solo era elevado; por isso, a alfafa requer um pH na faixa de 6,5-6,8 ou superior.

Outras culturas, como amendoim, melancia e batata-doce, se desenvolvem melhor em solos moderadamente ácidos, na faixa de pH de 5 a 6. No entanto, a maioria das plantas agrícolas se desenvolvem melhor na faixa de pH de 6 a 7,5.

As consequências da acidez dos solos para a agricultura são as mais variadas e contribuem para a baixa produtividade das mesmas. Vários problemas podem causar crescimento deficiente de plantas sensíveis à acidez dos solos de pH baixo. A seguir são relatadas as três mais comuns:

- alumínio e manganês são mais solúveis e podem ser tóxicos para as plantas;
- cálcio, magnésio, potássio, fósforo e molibdênio (especialmente necessário para a fixação de nitrogênio por leguminosas) podem ser deficientes; e
- a decomposição da matéria orgânica do solo fica mais lenta e promove diminuição da mineralização do nitrogênio.

Os problemas causados pela acidez do solo são, geralmente, menos severos e o pH ótimo é mais baixo, se o solo for bem abastecido com matéria orgânica. A matéria orgânica limita a toxidez por alumínio e, evidentemente, o húmus da matéria orgânica aumenta a CTC do solo.

O pH do solo não muda de maneira rápida em solos ricos em matéria orgânica. A acidificação dos solos é um processo natural, acelerado pelos ácidos produzidos no solo pela maioria dos fertilizantes nitrogenados. A matéria orgânica do solo diminui a acidificação e tampona o pH do solo, porque retém firmemente o hidrogênio (H^+). Assim, é necessário mais H^+ para diminuir o pH de um determinado volume de solo, quando mais matéria orgânica está presente. Naturalmente, o inverso também é verdade: mais calcário é necessário para elevar o pH de solos com teor elevado de matéria-orgânica para um determinado volume de solo.

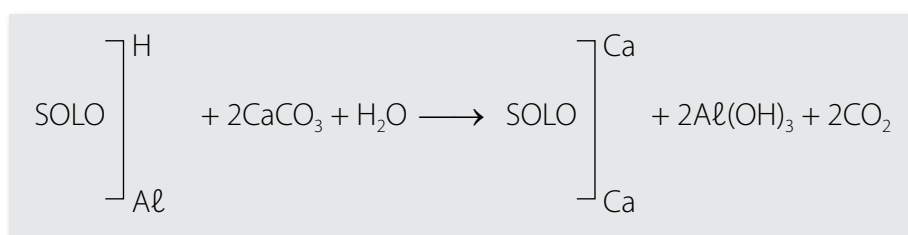
9.2 CORREÇÃO DA ACIDEZ DOS SOLOS

A correção da acidez do solo é feita por meio da *calagem*, em que se adiciona carbonato de cálcio ($CaCO_3$) para corrigir o pH do solo. A aplicação de calcário ajuda a criar um solo mais favorável, em muitos aspectos, para as plantas sensíveis à acidez, tais como:

- neutralizando os ácidos;
- por adicionar maiores quantidades de cálcio (porque o calcário é carbonato de cálcio, $CaCO_3$);
- pela adição de maiores quantidades de magnésio, quando for utilizado o calcário dolomítico (contendo carbonatos de cálcio e magnésio);
- tornando mais disponíveis o molibdênio, o fósforo e enxofre;
- ajudando a manter o fósforo adicionado por meio das adubações em uma forma disponível;
- aumentando a atividade bacteriana, incluindo os rizóbios que fixam o nitrogênio em leguminosas; e
- tornando o alumínio e o manganês menos solúveis.

O calcário é geralmente usado para aumentar o pH do solo em solos ácidos fortes. A quantidade de calcário necessária irá variar entre os solos. Solos, em geral, arenosos, precisam de menos calcário do que os solos de textura mais fina (argilosos). Além disso, solos com baixo teor de matéria orgânica precisam de menos calcário do que os solos orgânicos. Um teste de calcário irá incorporar esses efeitos, quando utilizado para determinar a quantidade de calcário necessária para elevar o pH do solo. Outros fatores necessários para determinar uma taxa de cal apropriado incluir alvo pH da planta específica, a qualidade do calcário, método de aplicação e economia.

Como efeito do uso de calcário tem-se, além da correção da acidez do solo, o estímulo à atividade microbiana, a melhoria da fixação simbiótica de N pelas leguminosas e, ainda, o aumento da disponibilidade da maioria de nutrientes para as plantas. A necessidade de calagem não está somente relacionada ao pH do solo, mas também, à sua capacidade tampão (CT) e à sua capacidade de troca de cátions (CTC). Solos com maior CT (mais argilosos) necessitam de mais calcário para aumentar o pH que os de menor CT (mais arenosos). A capacidade tampão relaciona-se diretamente com as quantidades totais de argila e de matéria orgânica no solo, assim como com o tipo de argila. A neutralização de um solo ácido com calcário (CaCO_3) pode ser representada pela reação:



Portanto, o calcário neutraliza a acidez representada por H + Al, deixando o solo com cálcio no lugar dos cátions de caráter ácido. O alumínio é precipitado como hidróxido e o gás carbônico é despreendido (Raij, 1991).

REFERÊNCIAS

- ALTIERI, M. A. et al. **O papel da biodiversidade no manejo de pragas**. Ribeirão Preto: Holos, 2003. 226 p.
- BALL, B. C. et al. Field assessment of soil structural quality: a development of Peerlkamp test. **Soil Use Management**, Oxford, v. 23, p. 329-337, 2007.
- BARUQUI, A. M.; FERNANDES, M. R. Práticas de conservação do solo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.11, n.128, p.55-69, 1985.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone, 1990. 335 p.
- BHERING, S. B.; SANTOS, H. G. (eds.). **Mapa de solos do Estado do Paraná**: legenda atualizada. Curitiba: Embrapa Florestas; Rio de Janeiro: Embrapa Solos; Londrina: Iapar, 2008. 74 p.
- BLUM, W. Basic concepts: Degradation, Resilience, and Rehabilitation. In: LAL, R.; BLUM, W. H.; VALENTINE, C.; STEWART, B. A. (Eds.) **Methods for Assessment of Soil Degradation**. Advances in Soil Science. Boca Raton: CRC Press, 1998. p. 1-16.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 14. ed. New Jersey: Pearson Higher, 2008. 992 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Especialistas discutem produção sustentável de hortaliças**, Data, 26 outubro 2010. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/comunicacao/noticias/2010/10/especialistasdiscutemproducao-sustentavel-de-hortalicas>>. Acesso em: 23 nov. 2011.
- BUOL, S. W. et al. **Soil genesis and classification**. 6. ed. Chichester: Wiley-Blackwell, 2011. 560 p.
- CASSELMANN, H. **Lumbricus rubellus HC1**. 2011. Disponível em: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lumbricus_rubellus_HC1.jpg>. Acesso em: 1 out. 2014.
- CERETTA, C. A. **Sistema de cultivo de mandioca em fileiras simples e duplas em monocultivo e consorciadas com girassol**. Porto Alegre, 1986. 122 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- DAKER, A. **A água na agricultura**; manual de hidráulica agrícola. 7. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1988. 543p.
- DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A. **Desafios à caracterização de solo fértil em manejo e conservação do solo e da água**. 2007. Disponível em: <http://www.plantiodireto.com.br/?body=cont_int&id=786>. Acesso em 1 out. 2014.
- DERPSCH, R. et al. **Controle da erosão no Paraná, Brasil**: sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, 1991. 268 p.

EDAFOLOGIA. **Tipos de água en el suelo**. 2014. Disponível em: <<http://edafologia2urjc.wikispaces.com/2.%20Tipos%20de%20agua%20en%20el%20suelo>>. Acesso em: 1 out. 2014.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; 2013. 353 p.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW)** – Managing systems at risk. Rome: FAO; London: Earthscan, 2011. 285 p.

FASSBENDER, H. W. **Química de suelos**: com ênfasis em suelos de América Latina. Costa Rica: Editorial IICA, 1980. 398 p.

FERREIRA, M. M. et al. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da Região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 515-524, 1999.

FIELDS, M.; SWINDALE, L. D. Chemical weathering of silicates in soil formation. **New Zealand Journal of Science and Technology**, v. 35, p. 140-154. 1954.

FOSTER, G. R. Modeling the erosion process. In: HAAN, C. T. et al. **Hydrologic modeling of small watersheds**. Saint Joseph: American Society of Agricultural Engineering, 1982. p. 297-380. (Monograph, 5).

GALETI, P. A. **Práticas de controle à erosão**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1984. 278 p.

GARDENING ABC. **Different soil type**: a basic idea on soil classification. Disponível em: <<http://gardeningabc.blogspot.com.br/2013/10/different-soil-type-basic-idea-on-soil.html>>. Acesso em: 30 set. 2014.

GIAROLA, N. F. B. et al. Método de avaliação visual da qualidade da estrutura aplicado a Latossolo Vermelho Distroférrico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, p. 2531-2534, 2009.

GILLEY, J. E. et al. Runoff and Erosion as Affected by Corn Residue: Part I. Total Losses. Transactions of the ASAE, v. 29, n. 1, p. 157-160. 1986.

GONÇALVES, J. L. M.; MELLO, S. L. M. O sistema radicular das árvores. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p. 219-267.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 1998. 771 p.

HUDSON, N. **Soil conservation**. 3. ed. Ames: Iowa State University Press, 1995. 391 p.

INSTITUTO DA POTASSA E DO FOSFATO. **Manual internacional de fertilidade do solo**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1998. 177 p.

JUMA, N. G. **The pedosphere and its dynamics**: A system approach to soil science. Introduction to soil science and soil resources, v. 1. Sherwood Park: Salman Productions, 1999. 335 p.

KÄMPF, N. et al. Mineralogia de solos brasileiros. In: KER, J. C. et al. (eds). **Pedologia: Fundamentos**. 1. ed. Viçosa: SBCS, 2012, pp. 81-145.

KOOREVAAR, P. et al. **Elements of Soil Physics**. Development of Soil Science, v. 13. Amsterdam: Elsevier, 1983, 228 p.

LAILER, K. J. **The world of physical chemistry**. Oxford: Oxford University Press, 1993, p. 292.

LAL, R. et al. Chapter 1: Pedospheric processes and the carbon cycle. In: LAL, R. et al. (eds). **Soil Processes and the Carbon Cycle**. Boca Raton: CRC Press, 1998, p. 1-8.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 2. ed. Piracicaba: O autor, 2000, 509 p.

LIMA, C. V. et al. **Conhecendo os principais solos do Paraná**: abordagem para professores do ensino fundamental e médio. 1. ed. Curitiba: SBCS / NEPAR, 2012. 18 p.

LOPES A. S.; GUILHERME, L. R. G. **Interpretação de análise de solo**: Conceitos e Aplicações. Ed. revisada. São Paulo, ANDA, 2004. (Boletim Técnico, 2). Disponível em: <http://www.anda.org.br/multimedia/boletim_02.pdf>. Acesso em: 23 set. 2014.

LYNDSAY, W. L. **Chemical equilibria in soils**. New York: John Willey & Sons, 1979, 449 p.

MAGDOFF, F.; VAN ES, H. **Building soils for better crops**: sustainable soil management. 3. ed. Waldorf: USDA/SARE, 2009. 294 p. (Handbook series; book. 10). Disponível em: <http://www.sare.org/Learning-Center/Books/Building-Soils-for-Better-Crops-3rd-Edition>>. Acesso em: 2 out. 2014.

MALAVOLTA, E. **Manual de Química Agrícola**. Nutrição de Plantas. São Paulo: Agronômica Ceres, 1976. 528 p.

MINEROPAR. **Parque Nacional do Iguaçu sítio geológico**. Disponível em: <<http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/publicacoes/ParqueNacionaldoIguacu.pdf>>. Acesso em: 30 set. 2014.

Naperville Country Club Grounds. **Soil and water**: soil profile. 2013. Disponível em: <<http://napervilleccgrounds.blogspot.com.br/2013/08/soils-and-water-soil-profile.html>>. Acesso em: 30 set. 2014.

NCRs - Natural Resources Conservation Service. **Soil Biology Primer Photo Gallery**. s.d. Disponível em: <<http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/photogallery/soils/health/biology/gallery/?cid=1788&position=Promo>>. Acesso em: 30 set. 2014.

NCRS - Natural Resources Conservation Service. 2011a. NRCS Photo Gallery. **Sediment in a farm pond**. Disponível em: <<http://photogallery.nrcs.usda.gov/netpub/server.np?find&catalog=catalog&template=detail.np&field=itemid&op=matches&value=3337&site=PhotoGallery>>. Acesso em: 1 out. 2014.

NCRS - Natural Resources Conservation Service. 2011b. NRCS Photo Gallery. **Narrow base terrace holds water temporarily. Terrace in northwest Iowa**. Disponível em: <<http://photogallery.nrcs.usda.gov/netpub/server.np?find&catalog=catalog&template=detail.np&field=itemid&op=matches&value=3467&site=PhotoGallery>>. Acesso em: 1 out. 2014.

OSHINS, C.; DRINKWATER, L. **An Introduction to Soil Health**. A slide set available at the Northeast Region SARE. 1999. Disponível em: <<http://www.uvm.edu/~nesare/slide.html>>. Acesso em: 12 ago. 2014.

PIMENTEL, D.; KOUNANG, N. Ecology of soil erosion in ecosystems. **Ecosystems**, v. 1, n. 5, p. 416-426. 1998.

PORTES, T. A. Aspectos ecofisiológicos do consórcio milho x feijão. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 10, n. 118, p. 30-34, 1984.

PRUSKI, F. F. **Conservação de solo e água**: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica. Viçosa: UFV, 2006. 240 p.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres, 1991. 343 p.

RAMALHO FILHO, A.; BEEK, K. J. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa - CNPS, 1995. 65 p.

RESENDE, M. et al. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. 2. ed. Viçosa: NEPUT, 1997. 334 p.

REZENDE, B. L. A. et al. Productivity of lettuce and radish cultivations as a function of spacing and of time of establishment of intercropping. **Acta Horticulturae**, Leuven: v. 607, p. 97-101. 2003.

REZENDE, B. L. A. et al. Produção das culturas consorciadas de tomate e alface em função da época de consorciação, em duas épocas de cultivo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras: v. 29, p. 77-83. 2005.

RIBEIRO, M. R. et al. Química dos solos salinos e sódicos. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (eds.). **Química e mineralogia do solo**. Parte II – Aplicações. Viçosa: SBCS, 2009. p. 449-484.

ROSA, A.H.; ROCHA, J.C. Fluxos de matéria e energia no reservatório solo: da origem à importância para a vida. **Cadernos Temáticos da Química Nova na Escola**, Sociedade Brasileira de Química, n.5, 2003. Disponível em http://qnesc.s bq.org.br/online/cadernos/05/fluxos_de_materia_e_energia_no_solo.pdf. Acesso em: 20 set. 2014

SALVADOR, C. A. **Olericultura - Análise da Conjuntura Agropecuária: Dezembro de 2012**. 2012. Disponível em: <http://www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/Prognosticos/olericultura_2012_13.pdf>. Acesso em: 2 out. 2014.

SEMEATO. **Plantio Direto**. Disponível em: <<http://www.semeato.com.br/pt-br/plantio-direto#conteudo>>. Acesso em: 30 set. 2014.

SILVA, A. C. F. **Plantio direto, cultivo mínimo e cobertura viva e morta no plantio de hortaliças (Blog na Internet)**. 2011. Disponível em: <<http://cultivehortaorganica.blogspot.com.br/2011/05/plantio-direto-cultivo-minimo-e.html>>. Acesso em: 30 set. 2014.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. **What is soil?** 2012. Disponível em: <<http://www.soils4kids.org/about>>. Acesso em: 30 set. 2014.

- SPARKS, D. L. Soil Science Society of America President's message. **CSA News**, 2000.
- SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**. 8th ed. Washington: Soil Survey Staff, 1998. 326 p.
- SUAREZ DE CASTRO, E. **Conservación de suelos**. 3. ed. San José: Editora IICA, 1980. 315p.
- TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.33, p.141-163, 1982.
- TOLEDO, M. C. M. et al. Intemperismo e Formação do Solo. In: TEIXEIRA, W. et al. **Decifrando a Terra**. São Paulo, Oficina de Textos, 2000. 568p. Il. p. 139-166.
- TOPP, G. C. et al. Changes in soil structure. In: ACTON, D. F.; GREGORICH, L. J. (eds). **The Health of Our Soils: Toward Sustainable Agriculture in Canada**, chapter 6. Centre for Land and Biological Resources Research. Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada. 1995. (Publication 1906/E). Disponível em: <http://web.archive.org/web/20040324063604/res2.agr.gc.ca/publications/hs/index_e.htm>. Acesso em: 10 ago. 2014.
- TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Embrapa Soja, 1999. 58 p. (Embrapa Soja. Circular Técnica, 23).
- TRANI, P.E.; TIVELLI, S.W.; PASSOS, F.A. **Horticultura Sustentável** - Parte II. 2010. Artigo em Hypertexto. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2010_3/HorticulturaSustentavel2/index.htm>. Acesso em: 5 out. 2014.
- TROEH, F. R. et al. **Soil and water conservation for productivity and environmental protection**. New Jersey: Prentice-Hall, 1980. 718 p.
- WALTRICK, P. C. **Erosividade de chuvas no Paraná**: atualização, influência do "El niño" e "La niña. e estimativa para cenários climáticos futuros. Curitiba, 2010. 107 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo, Área de Concentração: Pedologia e Manejo do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo/Universidade Federal do Paraná.
- WIKIMEDIA COMMONS. **Penetrometer**. 2010. Disponível em: <<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Penetrometer.jpg#filehistory>>. Acesso em: 30 set. 2014.
- WILSON, M. A. **Kelso sand march**. 2010a. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Areia#mediaviewer/File:KelsoSandMarch2010.jpg>>. Acesso em: 30 set. 2014.
- WILSON, M. A. **Pismo beach sand**. 2010b. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Areia#mediaviewer/File:PismoBeachSand.JPG>>. Acesso em: 30 set. 2014.
- YOUNG, R. O. ¿Sabes cuán ácido estás? Maneras de saberlo. 2013. Disponível em: <<http://blog.alkalinecare.com/2013/06/24/sabes-cuan-acido-estas-maneras-de-saberlo/>>. Acesso em: 1 out. 2014.



SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM RURAL

Administração Regional do Estado do Paraná

Rua Marechal Deodoro, 450 - 16º andar

Fone: (41) 2106-0401 - Fax: (41) 3323-1779

80010-010 - Curitiba - Paraná

e-mail: senarpr@senarpr.org.br

www.sistemafaep.org.br



Facebook
Sistema Faep



Twitter
SistemaFAEP



Youtube
Sistema Faep



Instagram
sistema.faep



Linkedin
sistema-faep



Flickr
SistemaFAEP