



C A P Í T U L O 2

QUÍMICA DO SOLO

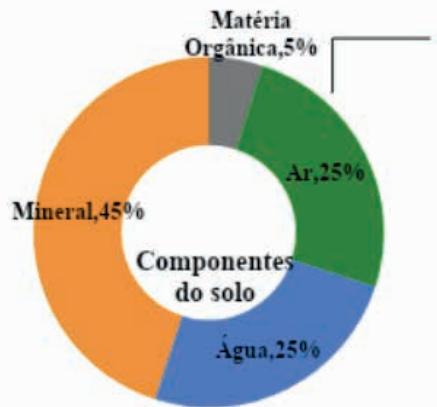
Caroline Aparecida Matias Pierzan

Juliana Maria Castilho Diniz

2.1 CONSTITUINTES DO SOLO

O solo é uma mistura variável de matéria mineral, matéria orgânica, água e ar (Figura 2.1), formando um sistema de fases sólida, líquida e gasosa, cujas proporções variam entre solos a depender do material de origem e das condições climáticas.

Figura 2.1- Proporção das fases sólida (mineral e matéria orgânica), líquida (água) e gasosa (ar) de um solo



Fonte: Adaptado de Meuer (2004).

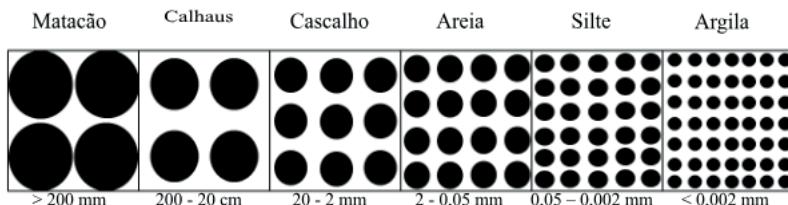
2.1.1 Fase sólida

A fase sólida representa aproximadamente 50% do volume do solo, sendo constituída por matéria orgânica (sólidos orgânicos) e matéria mineral (sólidos inorgânicos).

A matéria orgânica é formada pelo processo de decomposição e humificação dos resíduos vegetais e animais, sendo fonte de nutrientes para plantas e organismos do solo. O acúmulo de matéria orgânica no solo geralmente é pequeno ($\leq 5\%$ do volume do solo) e concentra-se nas primeiras camadas, sendo dependente de fatores como clima, vegetação, textura, umidade e uso do solo (Meurer, 2004).

Por sua vez, a matéria mineral é predominante nos solos, sendo representada por fragmentos de rochas e minerais com tamanhos e formas variáveis, classificadas em frações granulométricas com base no seu diâmetro (Figura 2.2).

Figura 2.2- Escala de frações granulométricas de partículas encontradas na fase sólida mineral do solo.



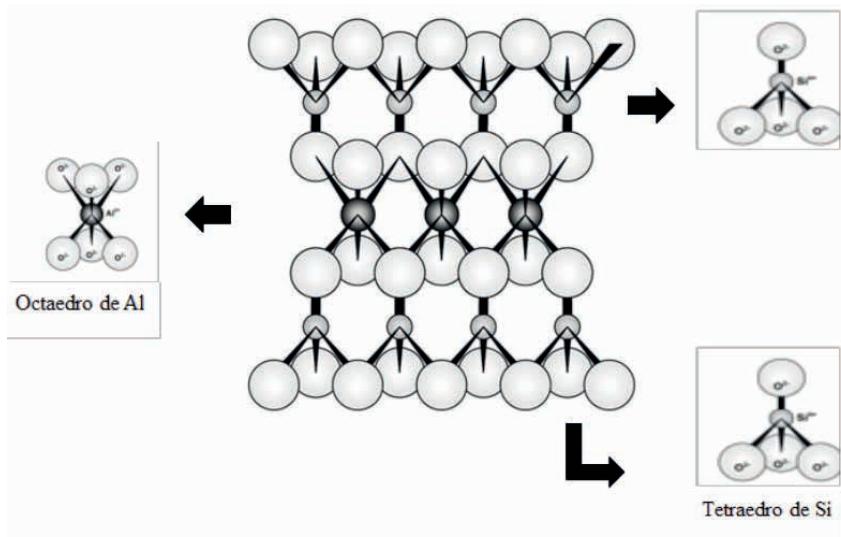
Fonte: Adaptado de Santos et al. (2013).

2.1.2 Fase líquida

A fase líquida é denominada como solução do solo, sendo constituída por água oriunda da precipitação (chuva, granizo, neve e nevoeiro) e por água subterrânea. Ainda, são encontrados na solução do solo minerais, compostos orgânicos dissolvidos e gases encontrados no solo.

Em geral, a água ocupa os microporos no solo (diâmetro $< 0,05\text{ mm}$). Entretanto, após períodos de chuva intensa, os macroporos (diâmetro $> 0,05\text{ mm}$) também são ocupados. Na sequência, a água encontrada nos macroporos é drenada para o lençol freático em resposta à ação da gravidade. Por sua vez, a água presente nos microporos não é removida pela gravidade, estando disponível para as plantas e para os organismos do solo. Também pode ocorrer o processo de evaporação, substituindo a presença de água nos microporos por ar (Lopes, 2017).

Figura 2.4- Estrutura de minerais secundários do tipo 2:1.



Fonte: Adaptado de Cresser; Killham e Edwards (1993).

2.2.1.1 Vermiculita

A vermiculita é originada de minerais hidratados de mica, apresentando capacidade de expansão de até 15 vezes seu volume original quando submetida a elevadas temperaturas. Este processo de expansão deve-se à liberação da água retida nas camadas internas do mineral, resultando em um material leve, poroso e de alta capacidade de retenção de água e nutrientes.

Na agricultura, a vermiculita é amplamente utilizada como um componente de substratos para plantas, contribuindo para aeração do solo, retenção de umidade e fornecimento de nutrientes essenciais às plantas.

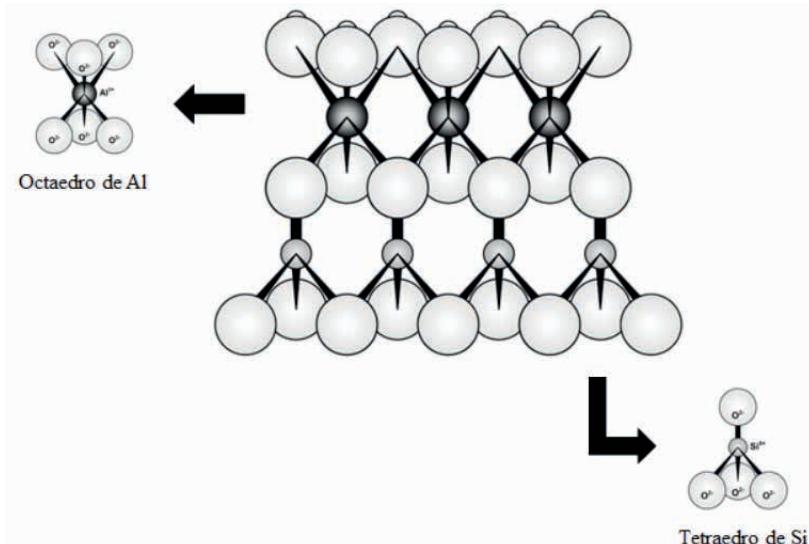
2.2.1.2 Esmectita

No grupo das esmectitas o principal representante é a montmorilonita. Apresenta alta substituição isomórfica de Si^{4+} por Al^{3+} nas lâminas tetraedrais e de Fe^{3+} por Mg^{2+} ou Fe^{2+} nas lâminas octaedrais. Isso resulta em um espaçamento basal variável entre 9,6 a 18 Å e uma capacidade de troca de cátions significativa. Os solos com presença significativa de montmorilonita tendem a ser altamente pegajosos e plásticos.

2.2.2 Minerais do tipo 1:1

Os filossilicatos do tipo 1:1 compreendem uma estrutura cristalina formada por uma lâmina de tetraedro de Si e uma lâmina de octaedro de Al (Figura 2.5). São comumente encontrados em solos altamente intemperizados, como argissolos, latossolos e nitossolos (Meurer, 2004; Rodrigues, 2018).

Figura 2.5- Estrutura de minerais secundários do tipo 1:1.



Fonte: Adaptado de Cresser; Killham; Edwards (1993).

2.2.2.1 Caulinita

A caulinita, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, apresenta baixa CTC e amplamente encontrado em solos altamente intemperizados, principalmente em solo de regiões tropicais e subtropicais, nos quais ocorre a lixiviação acentuada de bases do material de origem. Os minerais que podem dar origem à caulinita incluem olivinas, micas, piroxênios, plagioclásios e feldspatos alcalinos.

Os minerais do grupo da caulinita apresentam estrutura composta por uma lâmina de tetraedros de Si e outra de octaedros de Al. São tipicamente pouco expansivos devido à falta de hidratação das camadas estruturais, o que resulta em espaçamento basal de 7,2 Å e uma adsorção superficial reduzida. A estrutura praticamente eletricamente neutra da caulinita limita a ocorrência de substituição isomórfica, embora em variedades menos cristalinas possam ocorrer pequenas substituições.

2.2.3 Óxidos

Os óxidos de ferro (hematita e goethita) e de alumínio (gibbsita) são os resultados do processo de intemperismo, no qual a maioria dos íons foi lixiviada (Rodrigues, 2018).

- | **Gibbsita (Al(OH)_3):** É formada a partir da decomposição dos aluminossilicatos presentes no material de origem, isto é, ocorre a liberação de alumínio para a solução do solo, formando géis amorfos que se cristalizam ao perderem água, formando a gibbsita;
- | **Hematita (Fe_2O_3):** Consiste na forma oxidada e desidratada do Fe, sendo derivada de material de origem rico em minerais ferro-magnesianos. Apresenta forma hexagonal e confere aos solos uma coloração tipicamente avermelhada;
- | **Goethita (FeOOH):** Compreende a forma oxidada e hidratada do Fe, sendo uma estrutura mais estável que a hematita. A formação da goethita está relacionada a climas úmidos com drenagem restrita e em solos pobres em Fe. Seus cristais apresentam forma acicular e imprime uma coloração brunada ou amarelada aos solos.

2.2.4 Função dos minerais secundários no solo

Os minerais secundários desempenham funções essenciais nos solos, influenciando uma série de processos físicos, químicos e biológicos. Entre suas principais funções destacam-se:

- | **Capacidade de Troca de Cátions:** Muitos minerais secundários, como as argilas, têm a capacidade de reter íons nutrientes, como Ca, Mg, K e entre outros na superfície de suas partículas. Isso os torna reservatórios importantes de nutrientes para as plantas, liberando-os conforme necessário;
- | **Estabilidade de Agregados:** A presença de minerais secundários contribui para a formação e estabilidade de agregados no solo, o que melhora sua estrutura e favorece a infiltração de água e o desenvolvimento radicular;
- | **Retenção de Água:** A estrutura porosa dos minerais secundários permite a retenção de água no solo, tornando-a disponível para as plantas durante períodos de seca ou escassez de água;
- | **Adsorção de Poluentes:** Alguns minerais secundários têm a capacidade de adsorver poluentes orgânicos e inorgânicos do solo, ajudando a melhorar sua qualidade e reduzir os impactos ambientais negativos;
- | **Favorecimento da Atividade Biológica:** Muitos minerais secundários fornecem superfícies para a fixação de microrganismos benéficos, como bactérias fixadoras de nitrogênio e micorrizas, promovendo a saúde do solo e das plantas.

Em resumo, os minerais secundários desempenham funções diversas e interconectadas no solo. Seu estudo e compreensão são essenciais para o manejo sustentável dos recursos naturais e para o desenvolvimento de práticas agrícolas e ambientais mais eficientes e responsáveis.

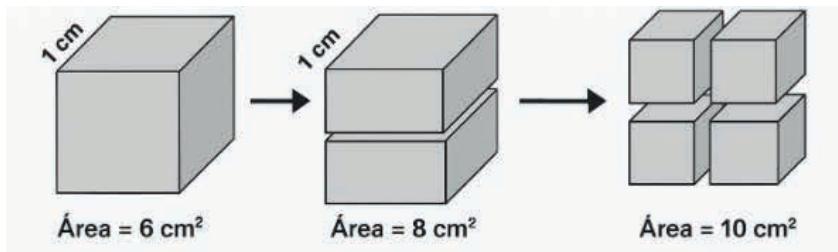
2.3. PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO

A fração argila é a sede dos fenômenos químicos e físico-químicos do solo, devido à sua natureza coloidal. Essa fração coloidal é altamente heterogênea e comprehende partículas de diferentes espécies minerais. Logo, as argilas apresentam propriedades distintas, como granulometria, área superficial, capacidade de troca iônica e viscosidade (Meurer, 2004).

2.3.1 Área superficial específica

A área superficial específica (ASE) é uma medida crucial na caracterização dos minerais do solo, sendo expressa como a relação entre a área superficial absoluta de um sólido e sua massa ($\text{m}^2 \text{ g}^{-1}$) (Figura 2.6). Esse parâmetro é fundamental porque determina a extensão das interações entre a fase sólida e as fases líquida e gasosa em um sistema (Cessa et al. 2009).

Figura 2.6- Aumento da área superficial específica de um cubo com sua divisão em unidades menores.



Fonte: Os autores.

A magnitude da ASE depende do tamanho e do tipo de minerais presentes no solo (Tabela 2.1), sendo diretamente proporcional ao com a redução do diâmetro, isto é, partículas menores apresentam maior ASE.

Tabela 2.1- Área superficial específica para diferentes frações e minerais do solo.

Fração	Mineralogia	Diâmetro mm	ASE $m^2 g^{-1}$
-	-		
Areia Grossa	Quartzo	2,0 – 0,2	0,01
Areia Fina	Quartzo	0,2 – 0,05	0,1
Silte	Minerais Primários	0,05 – 0,002	1
Argila	Minerais Secundários	< 0,002	5 - 800

Fonte: Cessa et al. (2009).

2.3.2 Cargas elétricas

Em solos, as partículas coloidais, como argilas e óxidos, exibem grupos funcionais que interagem com a solução do solo, promovendo desequilíbrios eletrônicos na forma de cargas elétricas positivas ou negativas.

As cargas negativas podem ser classificadas como permanentes ou dependentes do pH. As cargas elétricas permanentes são especialmente relevantes em argilominerais do tipo 2:1, onde surgem devido a substituições isomórficas durante a formação do mineral. Nessas substituições, como a troca de Al por Si nas lâminas tetraédricas e de Al por Mg nas lâminas octaédricas, resultam em um desequilíbrio de cargas positivas devido às menores valências do Al e Mg em relação ao Si e Al, respectivamente. Isso gera um excesso de cargas negativas distribuídas nas partículas.

Por outro lado, as cargas negativas dependentes do pH se concentram nas bordas dos argilominerais e na superfície de óxidos e matéria orgânica. Essas cargas são mais proeminentes em solos tropicais, onde as argilas do tipo 1:1 e os óxidos de Fe e Al são prevalentes no sistema coloidal. Como a quantidade de cargas permanentes é baixa nesses solos, a matéria orgânica se torna a principal fonte de cargas negativas, especialmente em solos ácidos.

2.3.3 Mecanismos de sorção

Os cátions no solo podem ser adsorvidos através de adsorção específica (ligações químicas de alta energia) ou adsorção não específica (ligação física de baixa energia). A adsorção específica envolve reações mais complexas, sendo predominante na retenção de metais como Al, Cu e Zn, especialmente na presença de argilominerais do tipo 2:1. Enquanto a adsorção não específica envolve, principalmente, Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} e Na^{2+} , os quais são atraídos pelas cargas negativas dos coloides do solo (Meurer, 2004).

A quantidade de cátions que um solo é capaz de reter é conhecida como capacidade de troca de cátions (CTC), uma propriedade essencial para avaliar a fertilidade do solo. A interação entre a fase líquida e sólida coloidal é crucial nesse processo, que permite que nutrientes fiquem disponíveis para as plantas, mas ao mesmo tempo evita que sejam lavados pela água infiltrada no solo. Logo, as cargas elétricas presentes nos coloides do solo são responsáveis pela adsorção de íons. Normalmente, predominam as cargas negativas, e a quantidade de cátions adsorvidos é muito maior do que aqueles presentes na fase líquida.

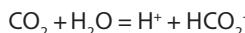
A adsorção de ânions, por sua vez, ocorre por meio de adsorção não específica ou física e adsorção específica com ligações químicas de alta energia. Enquanto os ânions como NO_3^- e Cl^- são fracamente adsorvidos e tendem a migrar para o lençol freático, íons como fosfato e sulfato podem formar ligações químicas mais fortes, especialmente em solos intemperizados ricos em caulinita e óxidos. Esse processo pode comprometer a disponibilidade desses nutrientes para as plantas, especialmente em solos tropicais ácidos.

Ainda, os mecanismos de sorção são influenciados por diversos fatores, como a valência do cátion ou do ânion, sua hidratação, concentração na solução do solo, tamanho e seletividade do coloide, entre outros.

2.4 ACIDEZ, ALCALINIDADE E SALINIDADE DO SOLO

2.4.1 Acidez e alcalinidade do solo

A acidez é um fator determinante à fertilidade, pois influencia na disponibilidade de nutrientes, na atividade dos microrganismos e no crescimento das raízes. O início da acidez do solo consiste na reação do gás carbônico com a água na atmosfera (Ernani, 2016).



Ainda, além de processos complexos naturais, a acidez do solo também decorre de processos antrópicos. Em síntese, estão entre as principais causas naturais e/ou antrópicas a composição do material de origem, a ação de agentes externos, a decomposição da matéria orgânica (MO) e as práticas agrícolas.

- I **Material de Origem:** Os solos podem ser naturalmente ácidos em função da baixa quantidade de bases do material de origem. Rochas ricas em minerais ácidos, como feldspato, podem contribuir para solos naturalmente ácidos. Ainda, processos de formação que favorecem a remoção de elementos básicos como K, Ca, Mg, Na e entre outros.

- Agentes externos:** A precipitação pode influenciar na acidez do solo, pois chuvas intensas e frequentes podem causar percolação de íons alcalinos do solo, aumentando sua acidez.
- Matéria Orgânica:** A decomposição dos resíduos vegetais pelo processo de mineralização e formação de substâncias húmicas também é uma fonte importante de acidez no solo, conforme visto no esquema abaixo:



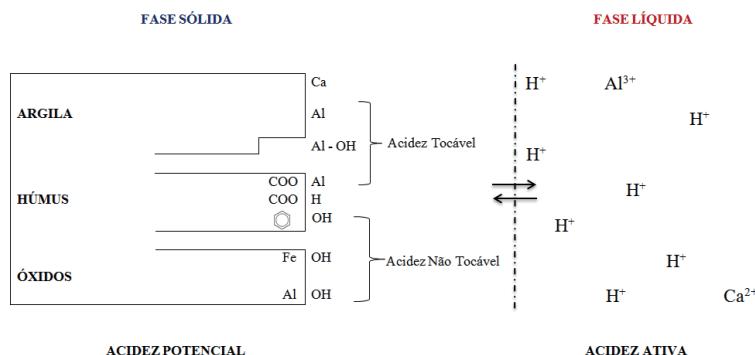
Com a percolação de ânions nitrato (NO_3^-) acontece concomitantemente o arraste de um cátion (Ca^{2+} , K^+ , Mg^+ e Na^+) para manter a solução do solo neutra. Logo, nas camadas superficiais mantêm-se os íons H^+ , acidificando o solo.

- Práticas Agrícolas:** O uso de fertilizantes (amoniacal e ureia) pode causar a redução do pH quando utilizados com elevada frequência e em solos com baixo poder tampão.

Também influencia na acidificação do solo o sistema de manejo. O sistema de plantio direto (SPD) permite o acúmulo de resíduos vegetais na superfície, favorecendo a acidificação do solo. Contudo, nesta condição não ocorre acentuada toxicidade de Al^{3+} devido à complexação pelas substâncias orgânicas formadas no processo de decomposição do material vegetal.

Os solos brasileiros são, em sua maioria, ácidos ($\text{pH} < 5,5$) em razão do alto grau de intemperização e da intensa lixiviação de bases. A acidez é subdividida em ativa ou potencial, e esta, por sua vez, em acidez trocável e acidez não trocável (Figura 2.7).

Figura 2.7- Representação da acidez potencial e acidez ativa do solo.



Fonte: Adaptado de Meurer (2004).

2.4.1.1 Acidez Ativa e Acidez Potencial

A acidez ativa refere-se à concentração de íons H⁺ na solução do solo, sendo sua medida expressa pelo valor de pH (Tabela 2.2), e calculada através do logaritmo negativo da concentração molar de H⁺ na solução (Equação 1).

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+] \quad (\text{Equação 1})$$

Tabela 2.2- Classificação da acidez do solo em função do valor de pH em água.

pH em água	Classificação
< 5,0	Extremamente ácido
5,0 – 5,5	Muito ácido
5,6 – 6,0	Ácido
6,1 – 6,5	Pouco ácido
6,6 – 7,0	Aproximadamente neutro
7,1 – 7,5	Pouco alcalino
7,5 – 8,0	Alcalino
> 8,0	Muito alcalino

Fonte: Meurer (2004).

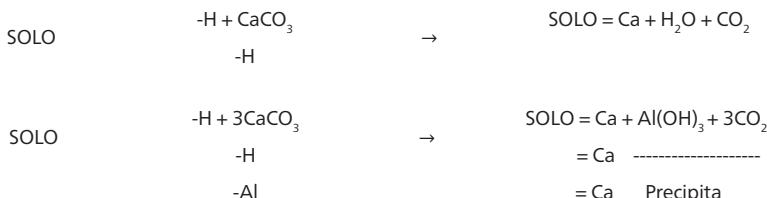
Enquanto a acidez potencial refere-se a todas as fontes de H⁺ nos componentes sólidos do solo, representados principalmente pelo alumínio trocável e grupos funcionais. Logo, a acidez potencial é proporcional aos teores de Al³⁺, argila e MO do solo e é determinada pelo índice SMP (Shoemaker, McLean, Pratt), medida que estima a necessidade de calagem do solo, indicando a quantidade de calcário necessária para corrigir a acidez. Enfatizando que, a correção do solo com utilização de calcário deve ser realizada através dos valores da acidez potencial, a qual é mais prejudicial ao crescimento e desenvolvimento das plantas.

Na acidez potencial é observada a acidez trocável, a qual compreende a quantidade de Al³⁺ adsorvido pelas cargas negativas do solo, mantendo o equilíbrio com a solução do solo. Enquanto a acidez não trocável refere-se à quantidade de H ligado aos grupos funcionais da MOS e dos óxidos e argila.

2.4.1.2 Correção da Acidez do Solo

A calagem é uma prática agrícola essencial para a correção da acidez do solo, possibilitando condições ideais para o desenvolvimento e crescimento vegetal. Em resumo, a calagem consiste na aplicação de calcário agrícola, o qual é capaz de gerar íons oxídrila e bicarbonato capazes de neutralizar os íons H⁺ no solo para elevar o pH e neutralizar a acidez (ERNANI, 2016).

O calcário agrícola é composto principalmente de carbonato de cálcio (CaCO_3) e carbonato de magnésio (MgCO_3). Quando aplicado ao solo, o calcário reage com a acidez presente, liberando íons de cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}), neutralizando os íons de hidrogênio (H^+) responsáveis pela acidez.



Em resumo, o carbonato de cálcio ou o carbonato de magnésio reagem com o hidrogênio do solo liberando água e gás carbônico. Enquanto o alumínio é insolubilizado na forma de hidróxido.

Essa reação de neutralização ajuda a elevar o pH do solo, tornando-o menos ácido e mais propício ao desenvolvimento das plantas. Contudo, a quantidade de calcário a ser aplicada depende do tipo de solo, do nível de acidez e das exigências nutricionais das culturas. Logo, recomenda-se realizar uma análise de solo para determinar a necessidade de calagem e calcular a dose adequada.

Em relação à calagem, é importante frisar que, além de corrigir a acidez, ela proporciona vantagens físicas, químicas e biológicas:

- I **Efeitos Físicos:** A presença de Ca^{2+} e Mg^{2+} promove a agregação das partículas do solo, melhorando sua estrutura e permitindo uma melhor aeração e infiltração de água. A calagem também pode reduzir a compactação, facilitando o desenvolvimento das raízes das plantas. Ainda, um solo mais bem estruturado e num grau de compactação menor, resultante da calagem, tende a ser mais resistente à erosão hídrica e eólica.
- I **Efeitos Químicos:** O calcário reage com os íons H^+ presentes no solo, elevando o pH e neutralizando a acidez. Durante a reação de neutralização, o calcário libera íons Ca^{2+} e Mg^{2+} , que são importantes nutrientes para as plantas. Também, o aumento do pH promovido pela calagem pode aumentar a disponibilidade de nutrientes no solo, especialmente de P e micronutrientes como Zn e Mn.
- I **Efeitos Biológicos:** Um pH adequado do solo devido à calagem pode promover a atividade microbiana benéfica, que auxilia na decomposição da MO e ciclagem de nutrientes. O uso de calagem pode melhorar a fixação simbiótica de N em leguminosas, promovendo um melhor aproveitamento desse nutriente pelas plantas. Também, um pH mais

adequado proporcionado pela calagem pode criar condições mais favoráveis para a atividade de minhocas, insetos benéficos e outros organismos do solo, contribuindo para a saúde e fertilidade do solo.

Por último, enfatiza-se que o efeito residual do calcário é de longa duração, contudo não é permanente uma vez que o processo de acidificação do solo continua mesmo depois que a calagem é realizada. Assim, cada ano devem ser coletadas amostras do solo para determinar o pH; se estiver abaixo dos valores recomendados, deve-se fazer nova aplicação de calcário, sendo que a utilização adequada do calcário permite uma reaplicação não antes de três anos de cultivo.

2.4.2 Salinidade do solo

A salinização refere-se ao aumento na concentração de sais solúveis no solo em razão a drenagem imperfeita. Logo, solos com excessos de sais (halomórficos) constituem-se em um fator limitante para a produção agrícola, devido ao aumento do potencial osmótico na solução do solo e a toxidez resultante da concentração salina e do efeito específico de íons, causando, também, a desestruturação, o aumento da densidade aparente e da retenção de água, a diminuição da infiltração de água e a redução da fertilidade (Carneiro, 2015).

Solos halomórficos ocorrem principalmente em regiões áridas ou semiáridas, nas quais a escassez de precipitação pluvial proporciona o acúmulo dos sais solúveis em resposta à dificuldade de percolação. Ainda, a elevada evapotranspiração e a presença de camadas impermeáveis contribuem para o aumento da salinidade do solo. Também, esse processo depende do material de origem, da qualidade da água de irrigação, da salinização de água marinha, e entre outros.

Os íons mais comuns em solos salinos são os ânions Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} e NO_3^- e os cátions Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , os quais formam sais solúveis como nitratos, sulfatos, carbonatos, bicarbonatos e cloretos.

2.4.2.1 Classificação dos Solos Halomórficos

Os solos halomórficos são formados pelos processos de salinização, solonização e solodificação são classificados com embasamento no conteúdo total de sais solúveis e na porcentagem de sódio trocável (PST) (Equação 2), o qual refere-se ao percentual de Na^+ em relação a CTC.

$$\text{PST} = \frac{\text{Na}}{\text{CTC}} \times 100 \quad (2)$$

Os métodos de estimação rápido e simples da quantidade total de sais solúveis do solo referem-se à determinação do valor de pH e da condutividade elétrica (CE), devido a que maiores concentrações salinas promovem aumento na concentração de íons e maior intensidade na corrente conduzida pela solução, logo a condução da corrente elétrica é diretamente proporcional à quantidade de íons na solução.

A utilização destes parâmetros permite a classificação dos solos halomórficos em solos salinos, sódicos e salinos-sódicos, como apresentado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Classificação dos solos com presença de sais solúveis com relação aos valores de pH, condutividade elétrica (CE) e porcentagem de sódio trocável (PST).

Classificação	pH	CE	PST
Salino	< 8,5	$\geq 4,0 \text{ dS cm}^{-1}$	< 15 %
Sódico	8,5 - 10	$< 4,0 \text{ dS cm}^{-1}$	$\geq 15 \%$
Salino-Sódico	$\leq 8,5$	$\geq 4,0 \text{ dS cm}^{-1}$	$\geq 15 \%$

Fonte: Gheyi et al. (2016).

- Solos Salinos: São caracterizados por apresentarem PST < 15%, pH < 8,5 e CE $\geq 4,0 \text{ dS m}^{-1}$. Os solos salinos apresentam elevada concentração de sais solúveis na solução do solo e ausência de quantidades expressivas de Na⁺ no complexo de troca, tornando os solos floculados e com permeabilidade igual ou maior que a de solos similares não salinos.
- Solos Sódicos: Caracterizam-se por apresentar PST $\geq 15\%$, CE $< 4,0 \text{ dS m}^{-1}$ e pH entre 8,5 e 10. Estes solos são resultantes da drenagem natural e/ou artificial de solos salinos-sódicos, resultando na permanência do Na⁺ no complexo de troca, proporcionando alterações químicas e físicas como, por exemplo, dispersão da argila e da MO.
- Solos Salinos-Sódicos: São solos com PST $\geq 15\%$, CE $\geq 4,0 \text{ dS m}^{-1}$ e pH $\leq 8,5$. São solos com características similares aos anteriores, com concentração maior de Na⁺. São solos com alta permeabilidade e estrutura física em razão a predominância de cátions divalentes.

2.4.2.2 Solos Salinos e Sódicos no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos

Os solos halomórficos não constituem uma classe individualizada no 1º nível categórico, logo, a salinidade e sodicidade separam classes em níveis hierárquicos mais baixos de diversas ordens do sistema, diferenciando-os em **caráter salino** (CE

$\geq 4,0 \text{ dS m}^{-1}$ e $< 7,0 \text{ dS m}^{-1}$), **caráter sálico** ($\text{CE} \geq 7 \text{ dS m}^{-1}$), **caráter solódico** (PST entre 6% a <15%) e **caráter sódico** ($\text{PST} \geq 15\%$) (Lopes; Silva; Guilherme, 1991; Gheyi et al. 2016).

Os altos níveis de salinidade (caráter salino) e sodicidade (caráter sódico) são utilizados para níveis de subordem e grande grupo. São observados nas classes de solos como Cambissolos, Gleissolos, Neossolos Flúvicos, Planossolos e Vertissolos localizados em posições baixas do relevo, como, por exemplo:

- | CAMBISSOLO FLÚVICO Sódico ou Sálico
- | CAMBISSOLO HÁPLICO Sódico
- | GLEISSOLO SÁLICO Órtico
- | GLEISSOLO SÁLICO Sódico
- | NEOSSOLO FLÚVICO Sódico ou Sálico
- | VERTISSOLO HÁPLICO Sódico ou Sálico
- | PLANOSOLO NÁTRICO Sálico

Por sua vez, solos com níveis moderados de sodicidade e salinidade são utilizados para separar classes no quarto nível (subgrupo) de várias classes de solos como, por exemplo:

- | CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico solódico
- | GLEISSOLO HÁPLICO Tb Eutrófico solódico ou salino
- | NEOSSOLO FLÚVICO Ta Eutrófico solódico ou salino
- | VERTISSOLO HÁPLICO Órtico salino ou solódico

2.4.2.3 Recuperação de Solos Halomórficos

A salinização dos solos pode ser revertida com a utilização de práticas de manejo apropriadas, considerando a qualidade e a quantidade de água, a permeabilidade do solo, a frequência de irrigação, o preparo do solo, o uso de fertilizante, a cultura, entre outros.

Para a reversão da salinização dos solos, pode ser realizada a percolação de água de boa qualidade, isto é, mínima concentração de eletrólitos. Outro método utilizado, principalmente para solos sódicos e salinos-sódicos, é a aplicação de gesso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Neste processo, ao realizar a aplicação de gesso agrícola, acontece o deslocamento do íon Na^+ pelo íon Ca^{2+} , formando o Na_2SO_4 , resultando em sua percolação.

2.5 MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

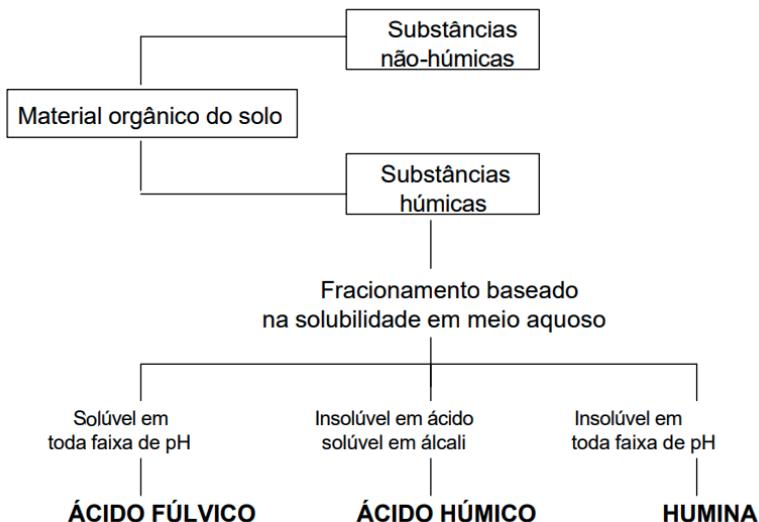
A matéria orgânica do solo (MOS) é um material complexo oriundo da decomposição dos resíduos vegetais e/ou animais, sendo constituído principalmente por carbono (52% a 58%), oxigênio (34% a 39%), hidrogênio (3,3% a 4,8%) e nitrogênio (3,7% a 4,15%) e pequenas quantidades de outros elementos (Carvalho, 2015; Bettoli et al. 2023).

No solo, a fração orgânica subdivide-se em diferentes formas com estabilidade química e efeito nas propriedades do solo bastante diferentes, como apresentado na sequência:

- I Resíduos Orgânicos ou Liteira: Refere-se à MOS formada por tecidos de plantas e/ou animais não decompostos e/ou decompostos parcialmente, encontrados na superfície do solo. Logo, deve ser excluído da amostragem para análise de fertilidade.
- I Fração Leve: Representa entre 2% e 30% da MOS. A fração é composta de resíduos em diversos estágios de decomposição. A sua composição química é semelhante à liteira por apresentar semelhança com o material de origem.
- I Biomassa Microbiana: Corresponde entre 2% e 5% da MOS. Consiste na biomassa microbiana e participa da decomposição dos resíduos adicionados ao solo. Possui potencial para liberar nutrientes às plantas pelo processo de mineralização de resíduos. Assim como, pode causar a imobilização temporária dos nutrientes, principalmente do nitrogênio.
- I Substâncias não-húmicas: No solo, compreende um total de 5% a 25%, entretanto, persistem por pequeno período devido à ação dos microrganismos. Apresentam estrutura química conhecida e são constantemente produzidos pelo ciclo dos organismos vivos no solo. Referem-se aos carboidratos (glicose, galactose, celulose, hemicelulose e lignina), aminoácidos (glicina e lisina), ácidos orgânicos de baixo peso molecular (ácido acético, ácido fórmico e ácido cítrico), gorduras e resinas.
- I Substâncias húmicas: Representam quase a totalidade de MOS. Refere-se a compostos orgânicos com elevado peso molecular, alta reatividade e coloração escura, resintetizados a partir do processo de humificação, formando o húmus. Sua estrutura química não é definida em razão a alta complexidade estrutural e química, dificultando a ação dos microrganismos, tornando o processo de decomposição lento e permitindo o acúmulo como MOS. Ainda, o húmus pode estar relacionado aos fenômenos de adsorção e precipitação com compostos inorgânicos, além de processos bioquímicos.

Também o húmus pode ser diferenciado em diferentes frações (humina, ácido húmico e ácido fúlvico) com embasamento em características da sua solubilidade em meio ácido e alcalino (fracionamento químico), como apresentado na Figura 2.8.

Figura 2.8- Representação do fracionamento químico da matéria orgânica do solo.



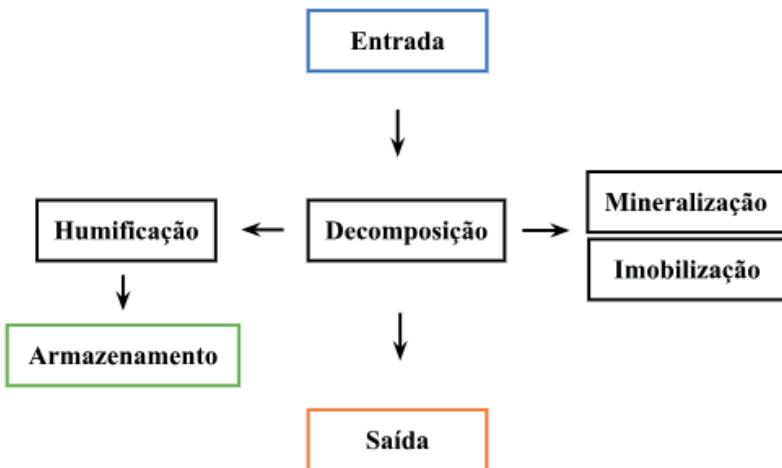
Fonte: Rosa (1998)

A humina é uma fração insolúvel em meio alcalino, mantendo-se junto à fração mineral. Por sua vez, o ácido húmico e o ácido fúlvico são extraídos do solo em meio alcalino. Contudo, com a acidificação do meio o ácido húmico é removido, enquanto o ácido fúlvico mantém-se na solução.

2.5.1 Dinâmica da matéria orgânica no solo

A dinâmica da MOS (Figura 2.9) compreende desde a incorporação dos resíduos e estende-se até a formação das frações humificadas mais estáveis (huminas) (Costa, 2013; Carvalho, 2015).

Figura 2.9- Dinâmica da matéria orgânica no solo.



A **entrada** da MOS acontece através de resíduos vegetais e resíduos animais, os quais são fonte de C para formação do húmus e de nutrientes essenciais para os microrganismos do solo. Na sequência ocorre o processo de **decomposição** dos resíduos orgânicos por meio dos microrganismos do solo, formando compostos mais simples através de processos bioquímicos e liberando nutrientes para N, P, S e entre outros minerais no solo.

Durante a decomposição, acontece a **humificação**, em que parte dos resíduos orgânicos é transformada em húmus. Também, durante a decomposição da MO, os nutrientes contidos nos resíduos orgânicos são **mineralizados** e transformados em formas disponíveis para as plantas. No entanto, parte desses nutrientes pode ser **imobilizada** por microrganismos do solo para seu próprio crescimento e metabolismo, reduzindo temporariamente a disponibilidade de nutrientes para as plantas.

A **saída** a MOS ocorre principalmente por meio da erosão do solo, lixiviação de compostos solúveis, volatilização de compostos gasosos e decomposição adicional de resíduos orgânicos por microrganismos do solo. A perda de matéria orgânica do solo pode ser acelerada por práticas agrícolas inadequadas, como o revolvimento excessivo do solo e a remoção de culturas de cobertura.

Por último, parte da matéria orgânica decomposta e humificada é **armazenada** no solo por longos períodos, contribuindo para a formação de horizontes orgânicos em solos desenvolvidos e aumentando a fertilidade do solo em longo prazo. O armazenamento de matéria orgânica no solo é influenciado por fatores como teor de argila, pH, drenagem e práticas de manejo do solo.

2.5.2 Funções da matéria orgânica do solo

O teor de MOS nos horizontes minerais varia entre 0,5 e 5% concentrando-se nas camadas superficiais, enquanto em solos orgânicos os valores são maiores. A presença de MOS proporciona efeitos nas propriedades biológicas, químicas e físicas do solo e no crescimento e desenvolvimento vegetal (Costa, 2013; Ernani, 2016).

- | Efeitos Químicos: A MOS é uma fonte importante de nutrientes (N, P, S, K e entre outros) para as plantas quando mineralizada pelos microrganismos. Também contribui significativamente para a capacidade de troca catiônica (CTC) do solo, como, por exemplo, Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , favorecendo a retenção de nutrientes e elevando a fertilidade do solo.

Ainda, a presença de grupos funcionais ácidos e básicos na MOS, influencia na regulação do pH do solo. Logo, a MOS pode atuar como um tampão e resistir a alterações intensas no pH do solo, mantendo o ambiente adequado para o crescimento das plantas.

Por último, a MOS pode formar complexos com metais pesados no solo, reduzindo sua disponibilidade e minimizando os efeitos tóxicos destes metais.

- | Efeitos Físicos: A presença de MOS promove a união das partículas do solo e agregados maiores, favorecendo a estabilidade do solo e melhorando a estrutura do solo e a capacidade de retenção de nutrientes e água. Também, contribui para a formação de espaço poroso no solo, estes que, além de habitat para os organismos do solo, são essenciais para a circulação de água, ar e nutrientes. Ainda, a cobertura do solo com resíduos orgânicos minimiza as variações de temperatura e umidade nas camadas superficiais durante o dia, e reduz o impacto das gotas da chuva no processo de desagregação das partículas. E solos com teores adequados de MOS são menos suscetíveis à compactação, pois a MOS mantém a estrutura do solo, tornando-o mais resistente à compactação causada por pisoteio animal e tráfego de máquinas agrícolas e/ou florestais.
- | Efeitos Biológicos: A MOS apresenta efeito fundamental e direto na atividade e diversidade da biota do solo através do fornecimento gradual de nutrientes (C, N, P, S e entre outros) para os microrganismos do solo. Ainda, alguns compostos orgânicos na MOS apresentam propriedades bioativas que influenciam a atividade e sobrevivência de pragas e patógenos no solo, sendo que microrganismos benéficos na MOS contribuem para o controle biológico de pragas e doenças ao competirem por recursos com patógenos. Logo, a presença de MOS favorece um ambiente viável para a biodiversidade microbiana, vegetal e animal.

TESTE SEU CONHECIMENTO ☺

01) A fase líquida do solo, também conhecida como solução do solo, é composta principalmente por:

- a) Fragmentos de rochas e matéria orgânica.
- b) Ar atmosférico e gases provenientes da respiração das raízes.
- c) Água, minerais dissolvidos e compostos orgânicos.
- d) Somente água da precipitação.

02) Analise as afirmações a seguir e marque (V) para verdadeiro ou (F) para falso:

- () A fase sólida do solo constituindo aproximadamente 50% do volume do solo e é composta exclusivamente por matéria mineral.
 - () A fase líquida do solo é denominada solução do solo e contém água, minerais dissolvidos e compostos orgânicos.
 - () Os gases presentes na fase gasosa do solo são iguais aos encontrados na atmosfera, sem variação nas concentrações de O₂ e CO₂.
 - () A matéria orgânica do solo concentra-se principalmente nas camadas profundas do solo e depende de fatores como clima, vegetação e uso do solo.
- a) V, V, F, V.
 - b) F, V, F, F.
 - c) F, V, V, F.
 - d) F, F, V, V.

03) Complete as sentenças a seguir:

- a) Os minerais do tipo 2:1 são caracterizados pela presença de uma folha _____ entre duas folhas _____.
- b) A estrutura da caulinita é formada por uma lâmina de _____ de Si e uma lâmina de _____ de Al.
- c) A _____ é um óxido de ferro que confere coloração avermelhada ao solo e apresenta forma _____.

04) Analise as afirmações abaixo e indique se são verdadeiras (V) ou falsas (F).

- a) () Os minerais secundários são formados exclusivamente a partir de processos de intemperismo de minerais primários.

- b) () Os filossilicatos do tipo 2:1, como esmectitas e vermiculitas, apresentam baixa capacidade de troca de cátions.
- c) () A caulinita é um mineral do tipo 2:1 encontrado em climas temperados, solos altamente intemperizados e possui baixa capacidade de expansão.
- d) () A hematita, Gibbsita e a goethita são exemplos de óxidos de ferro formados em solos com baixo teor de matéria orgânica.

05) Relacione os minerais aos seus principais atributos:

1. **Vermiculita**
2. **Caulinita**
3. **Hematita**
4. **Goethita**

- () Mineral com baixa capacidade de troca de cátions e pouca expansão.
- () Óxido de ferro, confere coloração avermelhada ao solo.
- () Estrutura expansível, usada em substratos agrícolas.
- () Óxido de ferro hidratado, coloração amarelada.

06) Entre os efeitos físicos da matéria orgânica do solo (MOS), destaca-se:

- a) Melhoria na estrutura do solo e aumento da capacidade de retenção de água.
- b) Diminuição da atividade microbiana e da diversidade biológica.
- c) Aumento da lixiviação de nutrientes e da erosão do solo.
- d) Acidificação intensa do solo, prejudicando o crescimento das plantas.

07) Indique se as afirmações abaixo são verdadeiras (V) ou falsas (F):

- () A fração argila do solo, devido à sua natureza coloidal, apresenta alta capacidade de troca iônica e desempenha um papel essencial nos processos químicos do solo.
- () As cargas elétricas permanentes nas argilas do tipo 2:1 são resultado de substituições isomórficas que ocorrem nas lâminas octaédricas e tetraédricas.
- () A adsorção específica de cátions no solo envolve principalmente íons como Ca^{2+} , K^+ e Na^+ , devido à sua forte ligação química com os coloides.

08) Assinale a afirmativa correta:

- a) A área superficial específica (ASE) é uma medida que relaciona a granulometria de um sólido e sua massa, influenciando diretamente as interações entre a fase sólida e as fases líquida e gasosa.
- b) Os ânions como fosfato e sulfato tendem a ser adsorvidos de forma específica, formando ligações químicas de alta energia com os coloides, especialmente em solos ricos em caulinita e óxidos de ferro.
- c) As cargas elétricas dependentes do pH são comuns nas bordas dos argilominerais e na superfície de óxidos e matéria orgânica, sendo influenciadas pelo pH do solo.

09) A acidez potencial do solo é composta por:

- a) Íons H⁺ dissolvidos na solução do solo.
- b) Al³⁺ trocável e grupos funcionais de argila e matéria orgânica.
- c) Apenas íons de cálcio e magnésio.
- d) Elementos solúveis e íons Na⁺.

10) Entre os efeitos físicos da matéria orgânica do solo (MOS), destaca-se:

- a) Melhoria na estrutura do solo e aumento da capacidade de retenção de água.
- b) Diminuição da atividade microbiana e da diversidade biológica.
- c) Aumento da lixiviação de nutrientes e da erosão do solo.
- d) Acidificação intensa do solo, prejudicando o crescimento das plantas.

11) Explique como o uso de fertilizantes amoniacais pode influenciar na acidez do solo e descreva como a prática da calagem pode corrigir essa acidez.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN-NETO, L.; ANDRADE, C. A (ed.). **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical**. Brasília: EMBRAPA, 2023. 788 p.

CARNEIRO, M. A. **Salinidade do solo, produtividade e qualidade de frutos de mangueira fertirrigada com fontes e doses de potássio**. 2015. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro, 2015.

CARVALHO, C. S. **Matéria orgânica, agregação e proteção física em solos tratados com lodo de esgoto.** 2015. 138 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agricultura Tropical e Subtropical, Instituto Agronômico, Campinas, 2015.

CESSA, R. M. A.; CELI, L.; VITORINO, A. C. T.; NOVELINO, J. O.; BARBERIS, E. Área superficial específica, porosidade da fração argila e adsorção de fósforo em dois latossolos vermelhos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 33, n. 5, p. 1153-1162, 2009.

COSTA, E. M.; SILVA, H. F.; RIBEIRO, P. R. A. Matéria orgânica do solo e o seu papel na manutenção e produtividade dos sistemas agrícolas. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 9, n. 17, p. 1842-1861, 2013.

CRESSER, M.; KILLHAM, K.; EDWARDS, T. **Soil chemistry and its applications.** Cambridge University Press, 1993.

ERNANI, P. R. **Química do solo e disponibilidade de nutrientes.** 2. ed. Lages: O Autor, 2016. 256 p.

GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F.; GOMES FILHO, E. **Manejo da Salinidade na Agricultura: estudos básicos e aplicados.** 2. ed. Fortaleza: Inctsal, 2016. 530 p.

LOPES, A. S.; SILVA, M. C.; GUILHERME, L. R. G. **Acidez do solo e calagem.** São Paulo: Anda, 1991. 17 p.

LOPES, A. S. **Fertilizantes e o seu uso eficiente.** São Paulo: ANDA, 2017. 245 p.

RODRIGUES, R. A. S. **Ciência do Solo:** morfologia e gênese. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A, 2018. 264 p.

ROSA, A. H. **Desenvolvimento de metodologia para extração de substâncias húmicas de turfa utilizando-se hidróxido de potássio.** Instituto de Química da UNESP, Araraquara, 1998.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C.; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo.** 6. ed. revista e ampliada. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013, 100 p.

SILVA, E. A. **Abordando o solo na escola:** para professores do ensino fundamental e médio. Curitiba: UFPR, 2020. 22 p.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. **O solo como sistema.** Curitiba: Edição dos Autores, 2011. 53 p.