

BOLETIM TÉCNICO Nº 2

INTERPRETAÇÃO DE ANÁLISE DE SOLO

CONCEITOS E APLICAÇÕES



ANDA
ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS

INTERPRETAÇÃO DE ANÁLISE DE SOLO

Conceitos e Aplicações

Alfredo Scheid Lopes *

Luiz Roberto Guimarães Guilherme **

1. INTRODUÇÃO

No processo de recomendação de corretivos e fertilizantes, é indispensável a utilização dos resultados da análise de solo da maneira mais eficiente possível.

Entretanto, nem sempre o técnico que orienta o agricultor, em relação a estas práticas, faz uso de todas as informações que podem ser obtidas a partir do boletim de análise de solo, sub-utilizando, muitas vezes, aspectos fundamentais para a tomada de decisão.

Para aumentar a eficiência do trabalho de diagnose de problemas de fertilidade do solo, é necessário que o técnico esteja familiarizado com conceitos básicos sobre o assunto e como estes podem ser utilizados de uma forma mais abrangente.

Neste contexto, uma recapitulação sobre colóides e íons do solo, capacidade de troca de cátions (CTC) e de ânions (CTA), inter-relações entre conceitos de acidez e CTC, teores e tipos de argila e matéria orgânica permite trabalhar melhor os resultados de análises de solo na proposição de soluções para os possíveis problemas de fertilidade.

Este trabalho escrito de maneira bem simples procura oferecer aos técnicos que prestam orientação a agricultores, em relação à recomendação de corretivos e fertilizantes, uma oportunidade para relembrar estes conceitos básicos e aplicá-los na solução prática de problemas do dia a dia.

Para facilitar a fixação dos aspectos práticos destes conceitos, são apresentados vários problemas de fertilidade do solo, sem pretender, entretanto, que as soluções encontradas sejam adequadas para todas as situações.

Espera-se que estas informações contribuam para maior eficiência na utilização de corretivos e fertilizantes, tendo como objetivo uma maior produtividade da agricultura brasileira.

Edição revisada em março de 2004

* Eng. Agr., MSc, PhD, Professor Emérito do Dept^o de Ciência do Solo, UFLA - Lavras, MG e Consultor Técnico da ANDA.

** Eng. Agr., MSc, PhD, Professor Adjunto do Dept^o de Ciência do Solo, UFLA - Lavras, MG.

2. COLÓIDES E ÍONS DO SOLO

À medida que os solos são formados, durante os processos de intemperização, alguns minerais e a matéria orgânica são reduzidos a partículas extremamente pequenas. Alterações químicas diminuem ainda mais estas partículas até o ponto em que elas não podem mais ser vistas a olho nu. Estas partículas de menor tamanho é que são chamadas de “colóides”.

Em termos práticos, o tamanho das frações da fase sólida do solo pode ser identificado de acordo com a seguinte classificação (Tabela 1):

Tabela 1. Classificação, quanto ao tamanho, dos componentes da fase sólida do solo.

Frações	Dimensões (mm)
Calhaus	20 a 2
Areia grossa	2 a 0,2
Areia fina	0,2 a 0,02
Limo	0,02 a 0,002
Argila	< 0,002 ou 2 micra (μ)

Os colóides argilosos são frações menores que 0,001 mm ou 1 micra. Os colóides orgânicos constituem-se no húmus, sendo produtos da decomposição da matéria orgânica, transformados biologicamente.

Um resumo da classificação dos tipos de colóides é mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. Classificação dos tipos de colóides.

Tipo de colóide	Composição
Minerais	Argilas silicatadas e argilas sesquioxídicas (óxidos, hidróxidos e oxi-hidróxidos de Fe e Al)
Orgânicos	húmus

Os cientistas de solos aprenderam que os colóides minerais (argilas) são, em geral, de estrutura semelhante a placas e de natureza cristalina (formam cristais). Na maioria dos solos, os colóides minerais encontram-se em maior quantidade que os colóides orgânicos. O ponto importante é que os colóides são os principais responsáveis pela atividade química dos solos.

O tipo do material de origem e o grau de intemperização do solo determinam os tipos de argila e as suas quantidades. O teor e qualidade do húmus são influenciados pelo tipo de matéria orgânica que o solo possui por natureza ou em decorrência de adições posteriores. Uma vez que os colóides do solo são formados das argilas e da matéria orgânica, sua reatividade global depende do material de origem, grau de intemperização e atividade microbiana, dentre outros fatores.

Os colóides (argila ou húmus) apresentam, em geral, um balanço de cargas negativas (-), desenvolvido durante o processo de formação. Isto significa que eles podem atrair e reter íons com cargas positivas (+), da mesma forma que pólos diferentes de um ímã são atraídos, ao passo que repelem outros íons de carga negativa, como pólos iguais de um ímã se repelem. Em certos casos, os colóides podem, também, desenvolver cargas positivas (+).

É comum dividir as cargas negativas dos solos em cargas permanentes e cargas dependentes do pH. Esta divisão é extremamente importante, como será visto no decorrer deste trabalho. As cargas permanentes existem nas estruturas dos minerais e, por esta razão, estão sempre operantes. Já as cargas dependentes do pH são efetivas ou não, dependendo do pH do meio.

Um elemento que apresenta uma carga elétrica é chamado de “íon”. Potássio, sódio, hidrogênio, cálcio e magnésio apresentam cargas positivas e são chamados “cátions”. Eles podem ser escritos na forma iônica (Tabela 3). Deve-se notar que alguns cátions possuem mais de uma carga positiva.

Tabela 3. Símbolo químico e forma iônica dos principais cátions.

Elemento	Símbolo químico	Forma iônica
Potássio	K	K^+
Sódio	Na	Na^+
Hidrogênio	H	H^+
Cálcio	Ca	Ca^{2+}
Magnésio	Mg	Mg^{2+}
Alumínio	Al	Al^{3+}

Os colóides de cargas negativas, os quais predominam na superfície dos solos, atraem os cátions e os retêm de modo semelhante ao ímã retendo pequenos pedaços de metal. Este conceito é ilustrado na Figura 1.

Esta característica dos colóides explica porque o nitrogênio na forma de nitrato (NO_3^-) lixivia mais facilmente no solo, do que nitrogênio na forma de amônio (NH_4^+). O nitrato apresenta uma carga negativa fraca. Assim sendo, é pouco retido no solo, permanecendo como íon livre na água do solo, passível de ser lixiviado através do perfil de certos solos e sob certas condições pluviométricas.

Íons de cargas negativas, tais como nitrato (NO_3^-) e sulfato (SO_4^{2-}) são chamados “ânions”. A tabela 4 mostra alguns ânions mais comuns.

Pode parecer estranho o fato das partículas coloidais do solo apresentarem cargas elétricas negativas (-) predominantemente, e positivas (+). Este é, sem dúvida alguma, um dos fenômenos mais importantes da natureza, somente suplantado pelo da fotossíntese no processo de manutenção da vida na face da terra.

A questão é: qual a origem das cargas elétricas no solo? Apesar de ser um aspecto um tanto teórico para fazer parte de um boletim técnico, algumas

implicações de ordem prática, decorrentes do seu conhecimento, justificam alguns comentários.

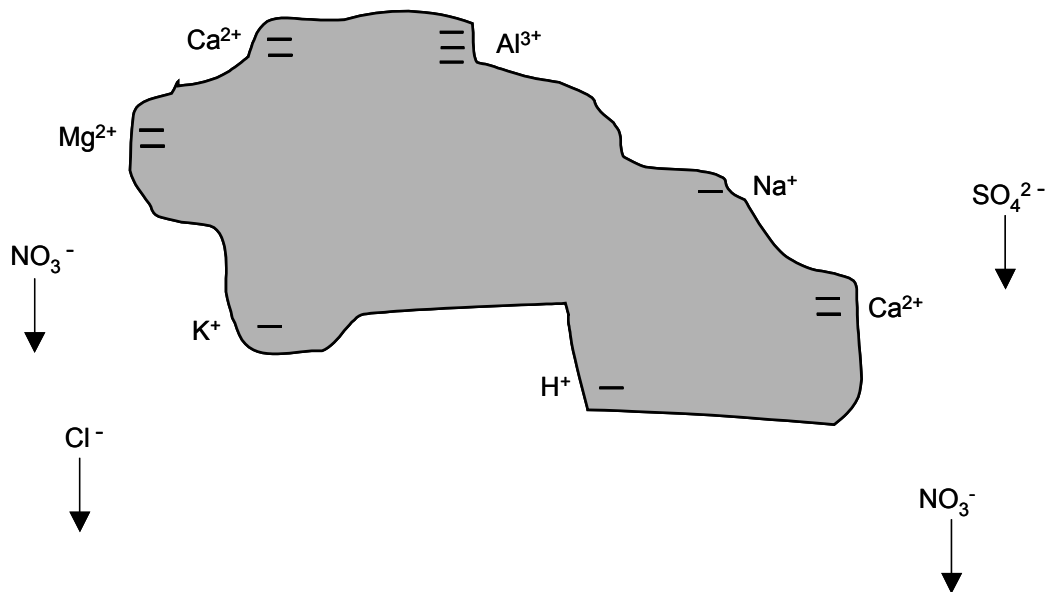
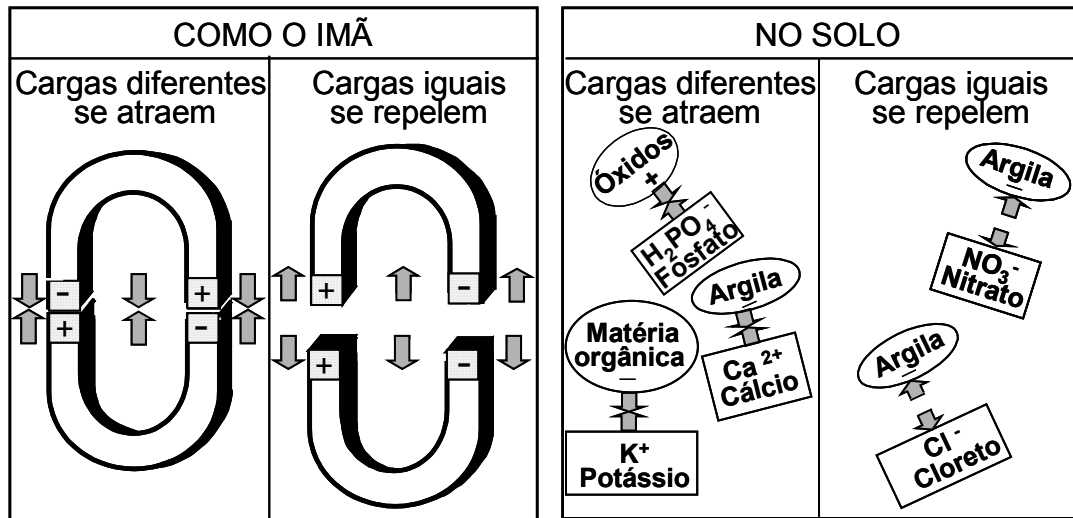


Figura 1. Demonstração de como, a semelhança de um ímã, as cargas negativas dos colóides do solo atraem ou repelem os cátions e ânions. Adaptado de Instituto da Potassa & Fosfato, 1998.

Tabela 3. Forma iônica dos principais ânions

Ânion	Forma iônica
Cloreto	Cl ⁻
Nitrato	NO ₃ ⁻
Sulfato	SO ₄ ²⁻
Fosfato*	PO ₄ ³⁻

* No solo são também comuns as formas HPO₄²⁻ e H₂PO₄⁻, sendo estas últimas as predominantes em solos agrícolas.

2.1. Origem das cargas negativas

As cargas negativas no solo, que em geral superam as cargas positivas, são originárias de: a) substituição isomórfica e b) dissociação do grupo OH.

a) Substituição isomórfica

Em certos tipos de argilas, notadamente aquelas do tipo 2:1 como as montmorilonitas, alguns átomos de Al^{3+} dos octaedros são substituídos por átomos de Mg^{2+} . Cada substituição resulta em uma valência (carga) negativa livre não atendida, uma vez que um átomo trivalente (Al^{3+}) é substituído por um divalente (Mg^{2+}) (Figura 2).

Do mesmo modo, em minerais como a ilita e beidelita, a substituição de átomo tetravalente (Si^{4+}) dos tetraedros por átomo trivalente (Al^{3+}) deixa uma valência (carga) negativa livre.

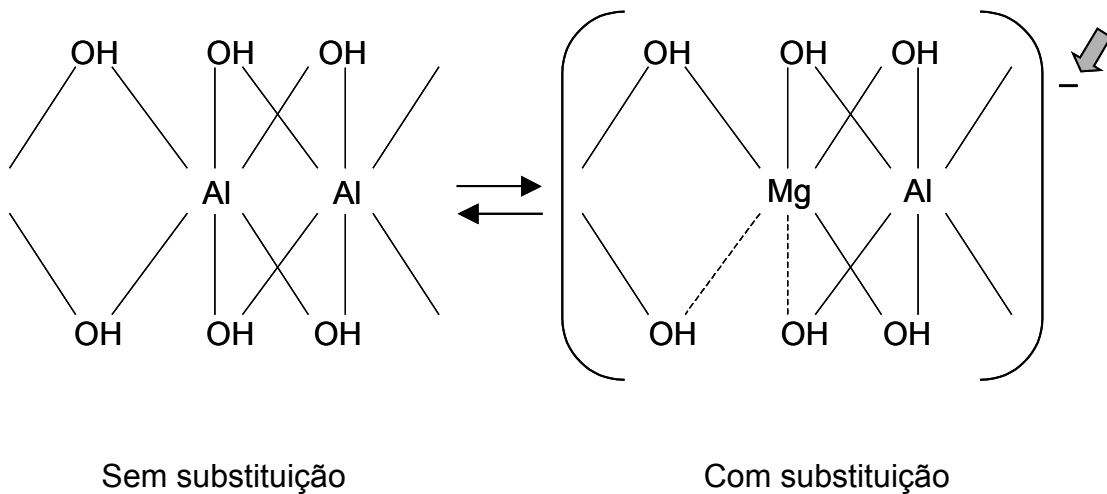


Figura 2. Exemplo de formação de cargas negativas por substituição do Al^{3+} por Mg^{2+} nos octaedros das argilas montmoriloníticas.

As cargas geradas pelo processo de substituição isomórfica são permanentes, pois não dependem do pH do solo para ocorrerem. Em solos em que predominam estes tipos de argila, este processo natural é responsável pela parcela principal de sua capacidade de adsorção ou capacidade de troca catiônica.

a) Dissociação do grupo OH

A presença do grupo OH nas bordas de um cristal de argila ou da matéria orgânica pode levar à dissociação de H⁺, havendo a formação de uma carga elétrica negativa.

As cargas oriundas da dissociação dos radicais orgânicos (carboxílicos, principalmente, e fenólicos, em menor escala), e minerais, principalmente sesquióxidos de ferro e alumínio, são chamadas de cargas dependentes do pH, pois, à medida que se eleva o pH, o seu aparecimento é favorecido. O mesmo pode ocorrer pela desobstrução de cargas da matéria orgânica ocupadas por alumínio, ferro e manganês. É um processo que ocorre em função da calagem adequada dos solos ácidos. Os gráficos apresentados na figura 3 ilustram estes fenômenos:

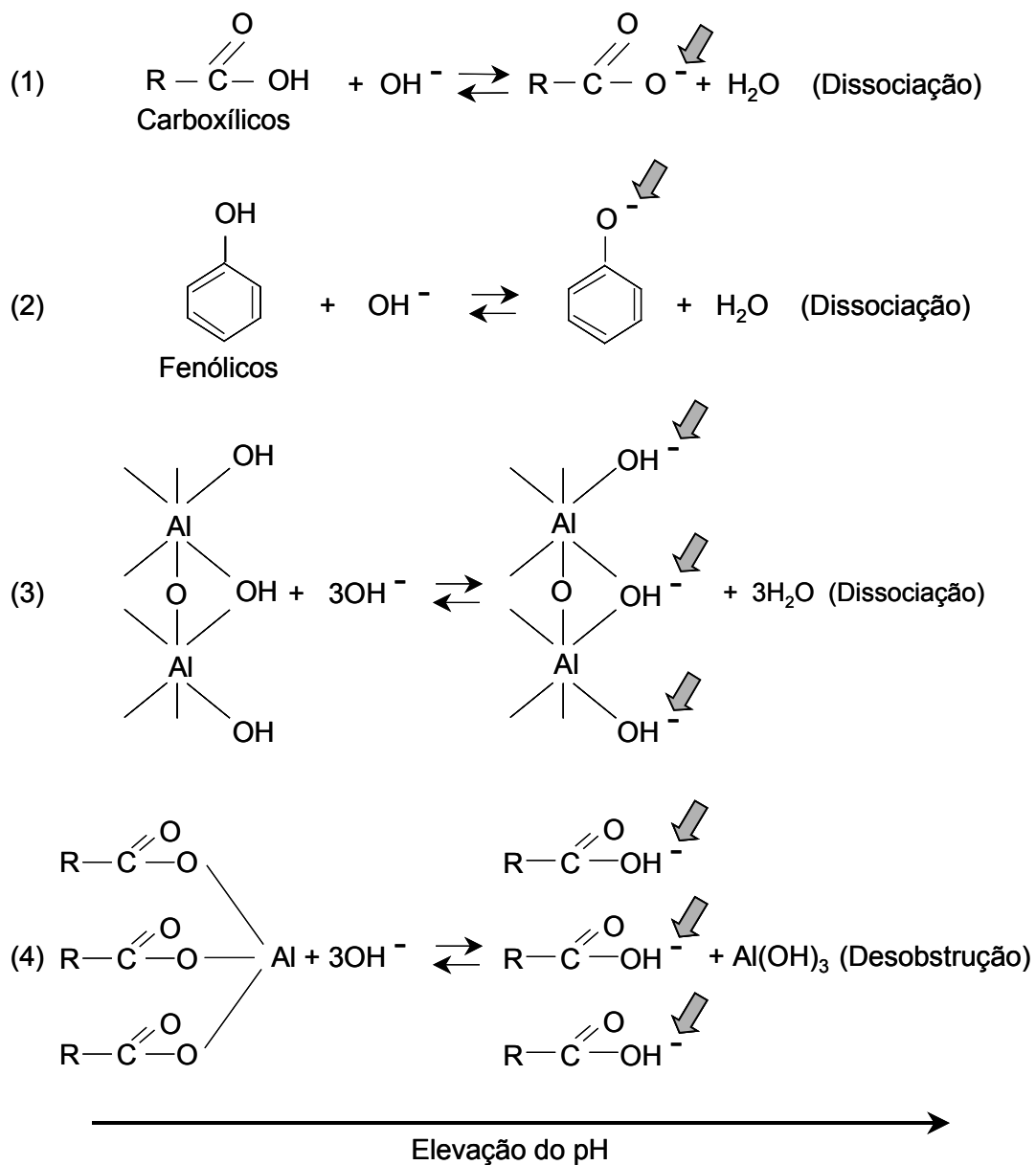


Figura 3. Exemplos de formação de cargas negativas pela elevação do pH, nos radicais carboxílicos (1) e fenólicos (2) da matéria orgânica, nos sesquióxidos (3) e em complexos orgânicos (4).

2.2. Origem das cargas positivas

Muitos solos da região tropical apresentam também cargas positivas, muito embora na grande maioria predominem as cargas negativas, como explicado anteriormente. Mesmo em solos que apresentam um teor considerável de cargas elétricas positivas, a presença da matéria orgânica, cuja quase totalidade é formada por cargas negativas e dependentes do pH, leva a um balanço final de cargas negativas nas camadas superiores do solo. Isto não elimina a possibilidade de ocorrer em certos solos, nas camadas subsuperficiais, uma predominância de cargas positivas.

As cargas positivas do solo ocorrem pela protonação das hidroxilas (OH) dos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, em condições de pH extremamente baixo (Figura 4).

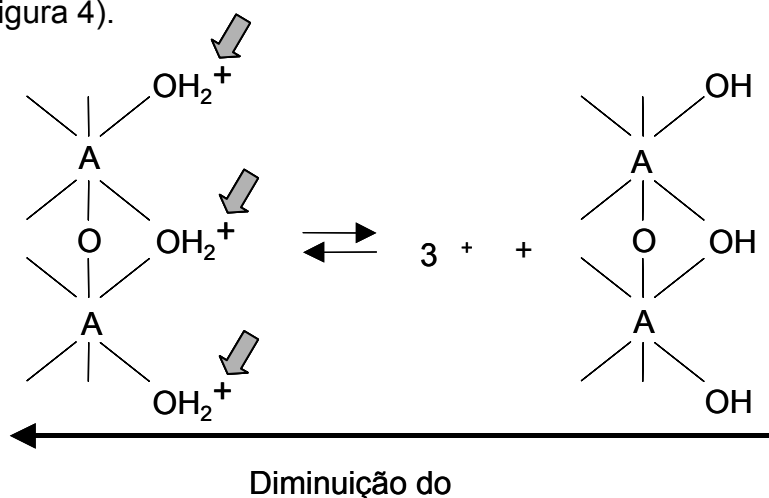


Figura 4. Formação de cargas positivas pela protonação das hidroxilas (OH) com a diminuição do pH (Fonte: Raji, 1981)

3. CAPACIDADE DE TROCA DE CÁTIONS (CTC) E CAPACIDADE DE TROCA DE ÂNIONS (CTA)

A origem das cargas elétricas do solo, tanto negativas como positivas, foi explicada no tópico anterior. Cabe agora ligar estes aspectos teóricos com a conceituação prática de CTC e CTA e, finalmente, com as implicações na fertilidade do solo.

As partículas (colóides) do solo 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 troca ou adsorção iônica, podendo ser catiônica (Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+ , etc) ou aniônica (NO_3^- , PO_4^- , HPO_4^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , etc).

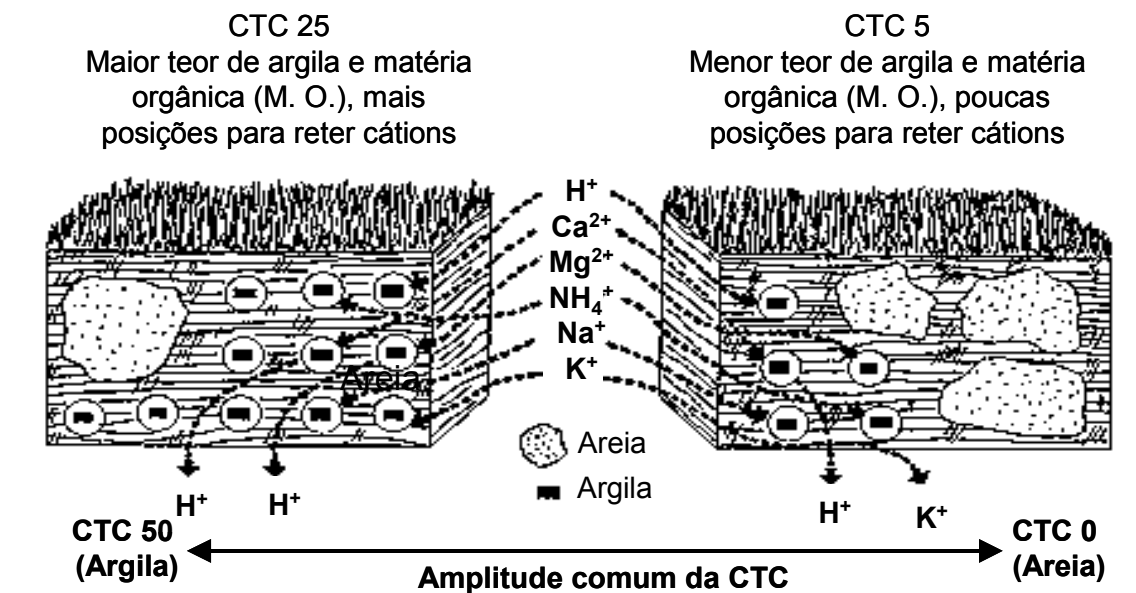
Como nos solos, em geral, predominam as cargas negativas, os estudos envolvendo CTC são muito mais abundantes do que aqueles sobre CTA.

3.1. Capacidade de troca de cátions (CTC)

Cátions retidos (adsorvidos) nos colóides 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, como será tratado mais à frente neste trabalho.

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 colóides.

Uma visão esquemática da CTC é mostrada na figura 5.



Algumas implicações práticas

SOLOS COM:
 CTC de 6 a 25 cmol_c/dm³

- Alta percentagem de argila e, ou, alto teor de M. O.
- Maior quantidade de calcário é necessária para aumentar o pH
- Maior capacidade de retenção de nutrientes a uma certa profundidade
- Maior capacidade de retenção de umidade

SOLOS COM:
 CTC de 1 a 5 cmol_c/dm³

- Alta percentagem de areias e, ou, baixo teor de M. O.
- Nitrogênio e potássio lixiviam mais
- Menor quantidade de calcário é necessária para aumentar o pH
- Menor capacidade de retenção de umidade

Figura 5. Uma visão esquemática de Capacidade de Troca de Cátions (CTC) e suas implicações práticas. Fonte: Adaptado de Instituto da Potassa & Fosfato, 1998.

Deve-se lembrar que muitos solos encontrados no Brasil, apesar de apresentarem alta percentagem de argila, comportam-se, em termos de CTC, de modo semelhante a solos arenosos. Isto é explicado pelo fato destas argilas serem, predominantemente, de baixa atividade (caulinita, sesquióxidos de ferro e alumínio, etc.). Muitos latossolos sob “cerrado” se enquadram nesta categoria.

3.2. Expressão da CTC

A CTC do solo é expressa em termos de quantidade de carga que os colóides podem reter por unidade de peso ou volume, sendo este último mais freqüente em análises de rotina.

Infelizmente, não existe uniformidade na forma de se expressar a CTC do solo o que pode levar a uma grande confusão, principalmente para os usuários pouco familiarizados com as modificações recentes nas unidades de expressão dos resultados de análise de solo. 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 dm^3 ($\text{cmol}_c/\text{dm}^3$) ou milimol de carga por dm^3 ($\text{mmol}_c/\text{dm}^3$). O termo $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ equivale, em valores numéricos, ao antigo miliequivalente por 100 cm^3 ($\text{meq}/100 \text{ cm}^3$). 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 .

Recordando: o que é 1 milimol de um cátion? É igual a 0,001 grama ou 1 miligrama (1 mg) de hidrogênio ou seu equivalente; ou, em outras palavras, é igual ao seu peso atômico, em g, dividido pela valência e dividido por 1.000.

Se ao invés de milimol estivermos tratando de centimol, então 1 centimol de carga de hidrogênio é igual a peso atômico em g / valência / 100, ou seja, é igual a 0,01 grama ou 10 miligramas (10 mg) de H^+ .

Resumindo (Figura 6):

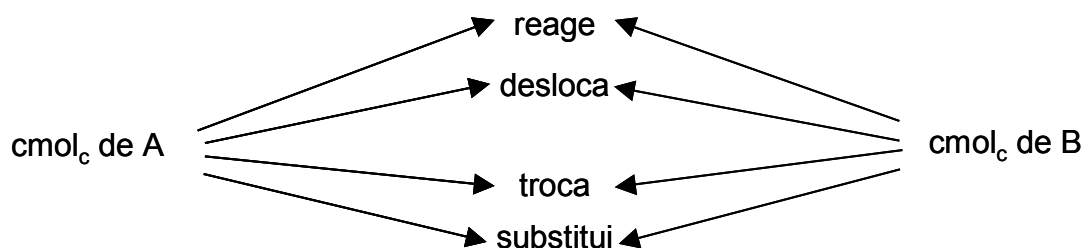


Figura 6. O processo de troca ou substituição dos cátions nas cargas negativas dos colóides.

Exemplo: Qual é o centimol de carga de cálcio em relação ao hidrogênio, ou seja, qual é a quantidade de cálcio necessária para deslocar 10 mg de hidrogênio?

$$\begin{aligned} 1 \text{ centimol}_c \text{ H}^+ &= \text{Peso atômico} \div \text{valência} \div 100 \\ &= 1,008 \text{ g} \div 1 \div 100 \\ &= 0,01008\text{g} \text{ ou } 10,08 \text{ mg de H}^+ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ centimol}_c \text{ Ca}^{2+} &= \text{Peso atômico} \div \text{valência} \div 100 \\ &= 40,08 \text{ g} \div 2 \div 100 \\ &= 0,2004 \text{ g} \text{ ou } 200,4 \text{ mg de Ca}^{2+} \end{aligned}$$

Portanto, 200 mg de Ca^{2+} deslocam 10 mg de H^+ e 1 cmol_c de Ca^{2+} equivale a 200 mg.

Exemplo: Qual é o centimol de carga de potássio, alumínio e magnésio?

$$\begin{aligned} \text{Potássio} &= 39,102 \div 1 \div 100 = 391,02 \text{ mg} \\ \text{Alumínio} &= 26,981 \div 3 \div 100 = 89,94 \text{ mg} \\ \text{Magnésio} &= 24,312 \div 2 \div 100 = 121,56 \text{ mg} \end{aligned}$$

3.3 Características do fenômeno de troca

Algumas características do fenômeno de troca merecem comentários adicionais, face às suas implicações de ordem prática:

a) O fenômeno de troca é reversível

Isto significa que embora haja um ponto de equilíbrio na reação, um cátion desloca outro e assim sucessivamente.

b) O fenômeno de troca é estequiométrico

Os cátions se substituem em quantidades equivalentes (por exemplo, 200 mg de Ca^{2+} por 10 mg de H^+ , ou 391,02 mg de K^+ , ou 121,56 mg de Mg^{2+} , ou 89,94 mg de Al^{3+}). Uma solução com 10 centimol_c de Ca^{2+} e que interage com um solo, provocando uma troca, poderá conter, no final, apenas 8 centimol_c de Ca^{2+} , mas terá que ter mais 2 centimol_c de outros elementos, que estavam adsorvidos ao mesmo.

c) O fenômeno de troca é instantâneo

Tão logo seja adicionado ao solo o novo cátion, a troca desse novo cátion com cátions já adsorvidos ao solo ocorre instantaneamente.

3.3. Fatores que afetam a CTC

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.

Dentre 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. Este 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, pode-se fazer inferências valiosas sobre o assunto. Na tabela 5 são apresentados alguns valores de CTC.

Tabela 5. Capacidade de troca de cátions de alguns materiais.
Fonte: Adaptado de Fassbender, 1980.

Material	CTC	Superfície específica	Tamanho
	(cmol _c /kg)	(m ² /g)	(micra)
Matéria orgânica humificada	100 - 250	-	-
Vermiculita	100 - 150	-	-
Montmorilonita	80 - 120	800	0,01 - 1,0
Ilita	30 - 50	100	0,1 - 2,0
Clorita	10 - 40	-	-

Glauconita	5 - 40	-	-
Haloisita	5 - 10	-	-
Caulinita	3 - 15	3	0,1 - 5,0
Óxidos de Fe e Al	2 - 5	-	-

Nas regiões tropicais, inclusive em grandes áreas no Brasil, onde os solos são mais intemperizados, predominando argilas de baixa atividade e teor baixo a médio 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 susceptíveis a perdas de nutrientes por lixiviação.

Deve-se ressaltar, entretanto, ser quase impossível determinar a contribuição individual dos componentes do solo, diferentes minerais de argila, sesquióxidos e matéria orgânica, na CTC, já que estes materiais encontram-se intimamente associados. É possível, contudo, determinar a contribuição da matéria orgânica e da fração mineral, conforme exemplificado a seguir. Deve-se destacar que, no estudo sintetizado na tabela 6, desenvolvido em solos do Estado de São Paulo, a matéria orgânica, apesar de ocorrer em teores bem mais baixos que a fração argila, foi a principal responsável pela CTC, contribuindo com 56 a 82% do total de cargas elétricas negativas. Estes dados ressaltam a importância de um manejo adequado da matéria orgânica, quando se tem por meta um aumento da capacidade de retenção de cátions no solo.

Tabela 6. Capacidade de troca de cátions de amostras de solos, total e da matéria orgânica. Fonte: Adaptado de Raij, 1981.

Legenda do solo	Profundidade cm	Teor de argila g/kg	Teor de matéria orgânica g/kg	CTC		CTC devida à matéria orgânica %
				Total cmol _c /dm ³	da matéria orgânica cmol _c /dm ³	
PVLs	0 - 6	50	8	3,2	2,2	69
Pml	0 - 15	60	6	3,3	2,1	64
Pln	0 - 14	120	25	10,0	8,2	82
Pc	0 - 16	190	24	7,4	6,0	81
PV	0 - 12	130	14	3,7	2,7	73
TE	0 - 15	640	45	24,4	15,0	62
LR	0 - 18	590	45	28,9	16,1	56
LEa	0 - 17	240	12	3,9	2,9	74

Estes 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.

A relação entre a CTC e o pH do meio, em dois tipos de argila, pode ser observada na tabela 7.

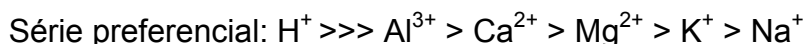
Tabela 7. Variação da CTC em função do pH do meio.
Fonte: Russel & Russel, 1968.

Tipo de argila	pH		Aumento	% de aumento
	2,5 a 6,0	7,0		
-----cmol _c /dm ³ -----				
Caulinita	4	10	6	150,0
Montmorilonita	95	100	5	5,3

Neste exemplo, o aumento da CTC foi mais ou menos igual em termos absolutos, tanto na caulinita como na montmorilonita (6 e 5 cmol_c/dm³). Entretanto, em termos percentuais, o aumento na caulinita foi muito maior. Na faixa mais baixa de pH (entre 2,5 a 6,0), a CTC praticamente não se alterou; porém, com a elevação do pH a 7,0, houve sensível liberação de cargas dependentes de pH, com profundas implicações em uma maior retenção de cátions.

3.4. Série preferencial de troca

Os cátions que estão adsorvidos aos colóides não são “presos” com a mesma intensidade, sendo, pois, passíveis de serem “trocados”, seguindo uma série preferencial. Para cada tipo de solo e para cada situação, há uma série preferencial. Entretanto, em um sentido bem amplo, a energia de ligação do cátion ao colóide aumenta com a valência e com o grau de hidratação do cátion, dentre outros fatores.



O hidrogênio é exceção à regra, pois, apesar de ser monovalente, apresenta uma ligação por covalência muito rígida, além da eletrostática.

3.5. Capacidade de troca de ânions (CTA)

Não existe um mecanismo totalmente definido para explicar a retenção de ânions pelo solo. Nitrato (NO₃⁻), por exemplo, é bastante móvel, movimentando-se livremente com a umidade do solo. Sob condições de chuva excessiva, movimenta-se no sentido descendente; sob condições de seca, movimenta-se no sentido ascendente. Sob situações extremamente secas, movimenta-se para cima com a umidade do solo, causando acúmulo de nitrato na superfície do solo.

Sulfato (SO₄²⁻) pode ser retido (fracamente retido) em alguns solos sob certas condições. Em valor baixo de pH (acidez), cargas positivas podem ser desenvolvidas nas arestas quebradas das argilas, tais como a caulinita, que podem adsorver sulfato. Também os sesquióxidos de ferro e alumínio (tanto nas camadas superficiais como sub-superficiais do solo) adsorvem algum

sulfato através da geração de cargas positivas. Mas, em geral, esta retenção é insignificante acima de pH 6,0.

4. CONCEITOS BÁSICOS SOBRE ACIDEZ DE SOLO E CTC

Apesar dos conceitos básicos de acidez e capacidade de troca de cátions (CTC) serem bastante conhecidos, tanto na região temperada como na região tropical, ainda existe muita confusão gerada pelo uso inadequado destes conceitos na solução de problemas ligados à fertilidade do solo.

Deve-se salientar que nem os princípios fundamentais da acidez do solo, nem aqueles ligados a CTC podem ou devem ser considerados em termos isolados, sendo óbvia a necessidade de se avaliar as inter-relações entre os mesmos.

Neste sentido, cabem algumas definições isoladas destes conceitos, como meta para avaliá-los em conjunto na diagnose de problemas ligados à fertilidade do solo.

4.1. Acidez ativa: é dada pela concentração de H^+ na solução do solo, sendo expressa em termos de pH, em escala que, para a maioria dos solos do Brasil, varia de 4,0 a 7,5. Esse tipo de acidez seria muito fácil de ser neutralizado, se não fossem outras formas de acidez, notadamente a acidez trocável, que tende a manter, ao final de reações no solo, altos índices de acidez ativa. Estima-se que um solo com pH 4,0 e 25% de umidade necessitaria apenas 2,5 kg de carbonato de cálcio puro, por hectare, para corrigir este tipo de acidez (acidez ativa).

4.2. Acidez trocável ($cmol_e/dm^3$ ou $mmol_e/dm^3$): refere-se ao alumínio (Al^{3+}) e hidrogênio (H^+) trocáveis e adsorvidos nas superfícies dos colóides minerais ou orgânicos por forças eletrostáticas. Este tipo de acidez é, nas análises de rotina, extraído com KCl 1 mol/L, não tamponado, que também é utilizado, em alguns laboratórios, para extrair cálcio e magnésio trocáveis.

Uma vez que existe muito pouco H^+ trocável em solos minerais (solos orgânicos já apresentam altos níveis de H^+ trocável), acidez trocável e Al trocável são considerados como equivalentes. Nos boletins de análise, este tipo de acidez é representado por Al trocável e expresso em $cmol_e/dm^3$ ou $mmol_e/dm^3$. A acidez trocável, também conhecida por Al trocável ou acidez nociva, apresenta efeito detrimental ao desenvolvimento normal de um grande número de culturas. Quando se fala que um solo apresenta toxidez de alumínio, isto significa que este solo apresenta altos índices de acidez trocável ou acidez nociva. Um dos principais efeitos da calagem é eliminar este tipo de acidez.

4.3 Acidez não-trocável ($cmol_e/dm^3$ ou $mmol_e/dm^3$): é a quantidade de acidez titulável que ainda permanece no solo, após a remoção da acidez trocável com uma solução de um sal neutro não-tamponado, como KCl 1 mol/L. Este tipo de acidez é representado por H^+ em ligação covalente (mais difícil de ser rompida) com as frações orgânicas e minerais do solo. O ponto relevante

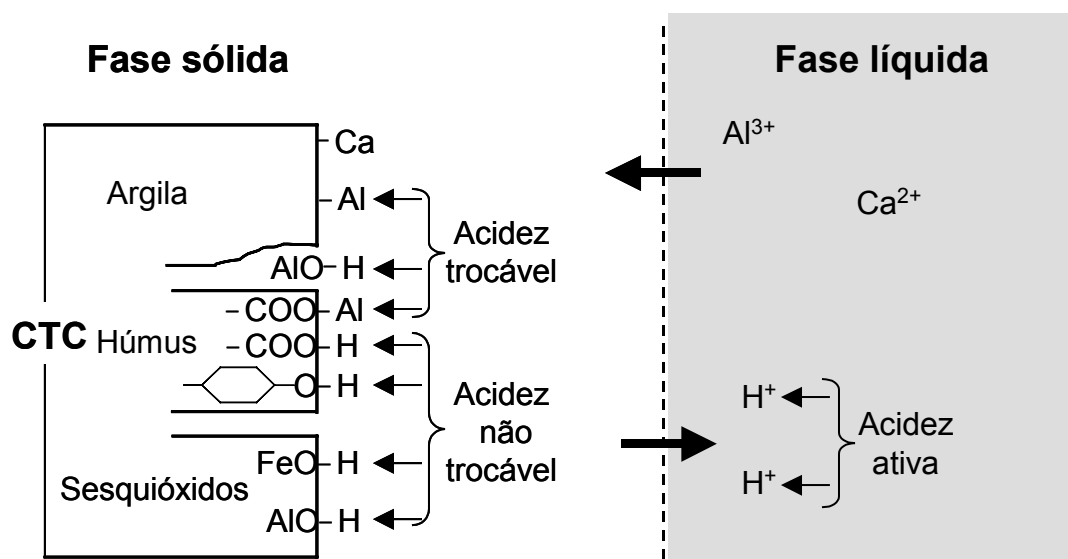
em relação a este tipo de acidez é que ela não é detrimental ao crescimento vegetal, embora, em certas situações, doses mais elevadas de calcário, que a neutralizem, total ou parcialmente, possam apresentar efeitos benéficos adicionais.

A avaliação da acidez não-trocável é feita subtraindo-se os valores da acidez trocável da acidez potencial ou total, sendo ambas expressas em $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ ou $\text{mmol}_c/\text{dm}^3$.

Outro ponto relevante é que a acidez não-trocável é uma estimativa das cargas negativas passíveis de serem liberadas a pH 7,0, em decorrência da metodologia utilizada. É, portanto, um parâmetro que interage intimamente com a CTC do solo.

4.4 Acidez potencial ou acidez total ($\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ ou $\text{mmol}_c/\text{dm}^3$): refere-se ao total de H^+ em ligação covalente mais $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ trocáveis, sendo usada na sua determinação uma solução tamponada a pH 7,0. Muitos laboratórios de rotina em fertilidade do solo, no Brasil, já incorporaram a determinação do $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$, com todas as implicações benéficas do conhecimento e utilização deste parâmetro.

Um esquema dos principais componentes de acidez, em relação às frações ativas da matéria orgânica, minerais de argila e sesquióxidos de ferro e alumínio é mostrado na figura 7, para uma consolidação mais efetiva destes conceitos.



$$\text{Acidez trocável} + \text{Acidez não trocável} = \text{Acidez potencial}$$

Figura 7. Componentes da acidez do solo na fase sólida e fase líquida. Fonte: Raij & Quaggio, 1984.

4.5. SB = Soma de bases trocáveis (cmol_c/dm³ ou mmol_c/dm³): este atributo, como o próprio nome indica, reflete a soma de cálcio, magnésio, potássio e, se for o caso, também o sódio, todos na forma trocável, do complexo de troca de cátions do solo. Enquanto os valores absolutos dos resultados das análises destes componentes refletem os níveis destes parâmetros de forma individual, a soma de bases dá uma indicação do número de cargas negativas dos colóides que está ocupado por bases. A soma de bases, em comparação com a CTC efetiva e Al trocável, permite calcular a percentagem de saturação de alumínio e a percentagem de saturação de bases desta CTC. Em comparação com a CTC a pH 7,0, permite avaliar a percentagem de saturação por bases desta CTC (V%), parâmetro indispensável para o cálculo da calagem, pelo método utilizado em alguns estados do País.

$$SB = \text{Soma de bases trocáveis} = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+} + (Na^{+}),$$

com valores expressos em cmol_c/dm³ ou mmol_c/dm³.

4.6. t = CTC efetiva (cmol_c/dm³ ou mmol_c/dm³): reflete a capacidade efetiva de troca de cátions do solo ou, em outras palavras, a capacidade do solo em reter cátions próximo ao valor do seu pH natural. Quando se compara a CTC efetiva de um solo virgem sob cerrado (1,0 cmol_c/dm³) com a de um Latossolo Roxo Eutrófico, por exemplo, 15,0 cmol_c/dm³, fica óbvio o comportamento diferencial destes solos em termos de retenção de cátions, perdas por lixiviação, necessidade de parcelamento das adubações potássicas, etc. Avaliando-se este parâmetro em conjunto com textura e teor de matéria orgânica, pode-se inferir uma série de dados adicionais relevantes ao adequado manejo da fertilidade dos solos

$$t = \text{CTC efetiva} = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+} + (Na^{+}) + Al^{3+},$$

com os valores expressos em cmol_c/dm³ ou mmol_c/dm³.

4.7. m% = Porcentagem de saturação por alumínio: expressa a fração ou quantos por cento da CTC efetiva estão ocupados pela acidez trocável ou Al trocável. Em termos práticos, reflete a percentagem de cargas negativas do solo, próximo ao pH natural, que está ocupada por Al trocável. É uma outra forma de expressar a toxidez de alumínio. Em geral, quanto mais ácido é um solo, maior o teor de Al trocável em valor absoluto, menores os teores de Ca, Mg e K, menor a soma de bases e maior a percentagem de saturação por alumínio. O efeito detrimental de altos teores de Al trocável e, ou, da alta percentagem de saturação por alumínio no desenvolvimento e produção de culturas sensíveis a este problema é fato amplamente comprovado pela pesquisa.

$$m\% = \text{Porcentagem de saturação por Al} =$$

$$= \frac{100 \times Al}{t} \quad \text{ou} \quad \frac{100 \times Al^{3+}}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+} + (Na^{+}) + Al^{3+}},$$

com os componentes expressos em cmol_c/dm³ ou mmol_c/dm³.

Subtraindo-se a percentagem de saturação por Al (m%) de 100%, obtém-se a percentagem de saturação por bases da CTC efetiva.

4.8. T = CTC a pH 7,0 (cmol_c/dm³ ou mmol_c/dm³): esta CTC, também conhecida como capacidade de troca de cátions potencial do solo, é definida como a quantidade de cátions adsorvida a pH 7,0. É um parâmetro utilizado nos levantamentos de solos no Brasil e, em geral, sub-utilizado em termos de avaliação de fertilidade. Sob o ponto de vista prático, é o nível da CTC de um solo que seria atingido, caso a calagem deste solo fosse feita para elevar o pH a 7,0; ou o máximo de cargas negativas liberadas a pH 7,0 passíveis de serem ocupadas por cátions.

A diferença básica entre a CTC efetiva e a CTC a pH 7,0 é que esta última inclui hidrogênio (H⁺) que se encontrava em ligação covalente (muito forte) com o oxigênio nos radicais orgânicos e sesquióxidos de ferro e alumínio, tão comuns nos solos brasileiros.

$$T = \text{CTC a pH 7,0} = S + (H^+ + Al^{3+}) = \\ = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + (Na^+) + H^+ + Al^{3+},$$

com os componentes expressos em cmol_c/dm³ ou mmol_c/dm³.

4.9. V% = Percentagem de saturação por bases da CTC a pH 7,0: este parâmetro reflete quantos por cento dos pontos de troca de cátions potencial do complexo coloidal do solo estão ocupados por bases, ou seja, quantos por cento das cargas negativas, passíveis de troca a pH 7,0, estão ocupados por Ca, Mg, K e, às vezes, Na, em comparação com aqueles ocupados por H e Al. É um parâmetro utilizado para separar solos considerados férteis (V% >50) de solos de menor fertilidade (V% <50).

É indispensável para o cálculo da calagem pelo método da elevação da saturação por bases, em uso em vários estados.

$$V\% = \frac{100 \times S}{T} = \frac{100 \times (Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + (Na^+))}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + (Na^+) + H^+ + Al^{3+}},$$

com os componentes expressos em cmol_c/dm³ ou mmol_c/dm³.

Subtraindo-se a percentagem de saturação por bases (V%) de 100%, obtém-se a percentagem de saturação por ácidos, H + Al, (m%) da CTC a pH 7,0.

Uma representação esquemática conjunta dos conceitos de acidez do solo e da CTC é mostrada na figura 8. A acidez ativa é aqui mostrada no valor do pH atual do solo (pH 4,9). A CTC a pH 7,0 é representada pelo reservatório que

abrange a soma de bases ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + (\text{Na}^+)$), a acidez trocável (Al^{3+}) e a acidez não trocável (H^+). Outro aspecto interessante nesta ilustração é que as bases ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + (\text{Na}^+)$) ocupam cerca de 50% da CTC efetiva e cerca de 20% da CTC a pH 7,0. Conseqüentemente, o conceito de saturação por bases depende do conceito de CTC envolvido.

Ainda na figura 8, pode-se deduzir que, à medida que se incorpora calcário ao solo, aumenta-se o nível de Ca e Mg, reduz-se o teor de Al, sendo que a pH 5,6 no solo não deve existir Al e, conseqüentemente, a percentagem de saturação por Al da CTC efetiva deve ser praticamente zero ou, em outras palavras, a percentagem de saturação por bases da CTC efetiva deve ser 100%, ou a acidez trocável deixa de existir. Para certas culturas, calagem apenas para neutralizar esta acidez trocável seria mais recomendável.

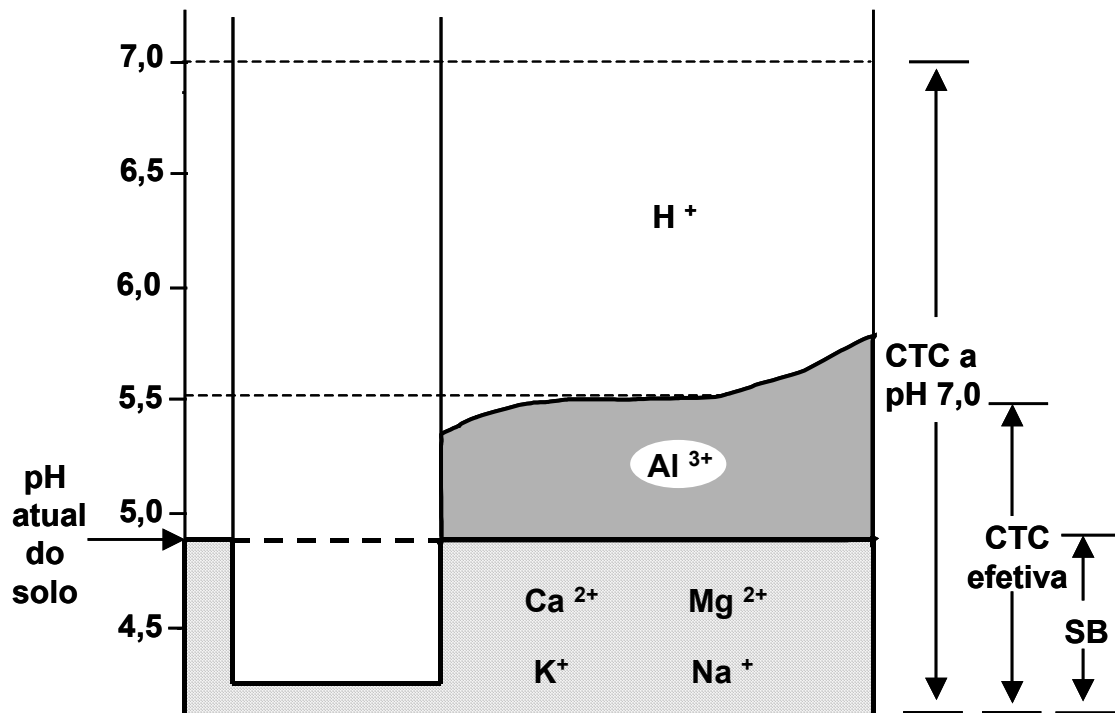


Figura 8. Representação esquemática conjunta dos conceitos da acidez do solo e da CTC. Fonte: Raij, 1981.

É importante comentar ainda que grande parte da CTC a pH 7,0 é ocupada por H^+ , que precisa ser neutralizado pela ação da calagem, se se deseja liberar cargas negativas que se encontram não dissociadas. Isto somente irá ocorrer com a elevação do pH acima do valor 5,6, onde o Al ou acidez trocável já deixa de atuar. Muitas culturas mostram efeitos benéficos da incorporação de calcário em doses mais elevadas, que irão neutralizar parte deste H^+ , ou parte desta acidez não trocável. Esta é a base do método da recomendação de calcário pelo critério de elevação de saturação por bases da CTC a pH 7,0, uma vez que elevar a saturação por bases corresponde a elevar o pH, diminuir a saturação por Al e gerar mais pontos de troca catiônica dependentes de pH.

5. EXEMPLOS PRÁTICOS PARA FIXAÇÃO DOS CONCEITOS

De posse dos resultados de análise de uma gleba, o técnico que irá orientar na recomendação das doses de calcário e de fertilizantes não deve se restringir apenas ao mínimo possível de uso destes dados. Com um pouco de esforço e, sobretudo pela aplicação dos conceitos básicos discutidos anteriormente, pode-se inferir muitas outras observações de valor no conhecimento e manejo da fertilidade do solo.

Na tabela 8, são apresentados resultados de análise de solos (camada 0 a 20 cm), sobre os quais serão feitos vários exercícios, tentando-se responder a algumas perguntas de cunho prático. Na tabelas 1A, 2A, 3A, 4A e 5A (Apêndice) encontram-se os critérios de interpretação de análises de solos para fins de avaliação da fertilidade em uso nos Estados de Minas Gerais, São Paulo, Rio Grande do Sul/Santa Catarina, Espírito Santo e região dos cerrados. A discussão dos exercícios apresentados a seguir é feita, principalmente, com base nos dados da tabela 1A.

Tabela 9. Resultados de uma análise de solo (camada de 0 a 20 cm) para avaliação da fertilidade.

pH H ₂ O	pH CaCl ₂	Ca ^(*)	Mg ^(*)	Al ^(*)	H + Al ^(*)	K	P Mehlich	P Resina
-----cmol _c /dm ³ -----						-----mg/ dm ³ -----		
4,6	4,0	0,4	0,1	1,5	5,2	20	1	5

S-SO ₄ ²⁻	B	Cu	Fe	Mn	Zn	M. O.	Argila	Silte	Areia
-----mg/ dm ³ -----						-----g/kg-----			
4	0,2	1,5	16	6	0,3	20	600	40	360

(*) Se os dados da análise estiverem em mmol_c/dm³, o usuário deverá dividir o valor por 10 antes de efetuar cálculos envolvendo a unidade cmol_c/dm³.

Nas tabelas 6A e 7A, são apresentados fatores de conversão entre unidades e representação dos macronutrientes, além de fatores multiplicativos de transformação dos resultados analíticos no solo. Essas tabelas têm por objetivo facilitar os cálculos nos exercícios apresentados a seguir e o treinamento no uso inteligente das mesmas é altamente recomendável. Toda vez que for aplicável o uso desses fatores de conversão e multiplicativos aparece, em baixo da respectiva operação no exercício, em negrito, a chamada da respectiva tabela e fator utilizado.

Os respectivos cálculos são também feitos sem o uso dos fatores de conversão e multiplicativos, para que o usuário possa avaliar como esses fatores são importantes para facilitar o trabalho.

Com a finalidade de simplificar a solução dos exercícios, os símbolos dos íons estão sendo apresentados sem a indicação das respectivas valências.

- 1) Calcular os parâmetros: soma de bases (S); CTC efetiva (t); percentagem de saturação por Al da CTC efetiva (m %); CTC a pH 7,0 (T); percentagem de saturação por bases da CTC a pH 7,0 (V%). Discutir estes e outros resultados à luz de princípios agronômicos.

a) Soma de bases = SB = Ca + Mg + K

Como o resultado do K foi dado em mg/dm³, é necessário transformar 20 mg/dm³ em cmol_c/dm³, para calcular a soma de bases e outros parâmetros.

$$\begin{aligned} 20 \text{ mg K} &\rightarrow 1 \text{ dm}^3 \text{ de solo} \\ X \text{ g K} &\rightarrow 1 \text{ dm}^3 \text{ de solo (A)} \end{aligned}$$

(A) Tabela 6A: mg/dm³ → g/dm³ = mg/dm³ x 0,001

$$\text{ou } X = \frac{1 \text{ dm}^3 \text{ de solo} \times 20 \text{ mg de K}}{1 \text{ dm}^3 \text{ de solo}} = 0,02 \text{ g de K/dm}^3 \text{ de solo}$$

Por definição, tem-se que:

$$\text{cmol}_c = \text{peso atômico em g} \div \text{valência} \div 100$$

Conseqüentemente:

$$1 \text{ cmol}_c \text{ K} = 39,102 \div 1 \div 100 = 0,39102 \text{ g K}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ cmol}_c \text{ K} &\rightarrow 0,39102 \text{ g K} \\ X \text{ cmol}_c \text{ K} &\rightarrow 0,02 \text{ g K (A)} \end{aligned}$$

(A) Tabela 7A: g K → cmol_c K = g x 2,5582

$$\text{ou } X = \frac{0,02 \text{ g K} \times 1 \text{ cmol}_c \text{ K}}{0,39102 \text{ g K}} = 0,05 \text{ cmol}_c \text{ K}$$

Conseqüentemente:

$$20 \text{ mg/dm}^3 \text{ K} = 0,05 \text{ cmol}_c \text{ K/dm}^3$$

Portanto: Soma de bases = SB = 0,4 + 0,1 + 0,05 = 0,55 cmol_c/dm³

b) CTC efetiva = t = SB + Al = Ca + Mg + K + Al

$$= 0,4 + 0,1 + 0,05 + 1,5 = 2,05 \text{ cmol}_c / \text{dm}^3$$

c) Percentagem de saturação por Al da CTC efetiva = m%

$$= 100 \times \frac{\text{Al}}{\text{SB} + \text{Al}} = 100 \times \frac{\text{Al}}{\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} + \text{Al}}$$

$$= 100 \times \frac{1,5}{2,05} = 73,2\% \text{ ou m\%} = 73,2\%$$

d) CTC a pH 7,0 = T = S + (H + Al) = Ca + Mg + K + H + Al

$$= 0,4 + 0,1 + 0,05 + 3,7 + 1,5 = 5,75 \text{ cmol}_c / \text{dm}^3$$

e) Percentagem de saturação por bases da CTC a pH 7,0 = V%

$$= 100 \times \frac{\text{S}}{\text{T}} = 100 \times \frac{\text{S}}{\text{S} + (\text{H} + \text{Al})} = \frac{100 \times 0,55}{5,75} = 9,6\% \text{ ou V\%} = 9,6\%$$

Estes dados, juntamente com os outros resultados da análise deste solo, permitem fazer uma série de inferências práticas, das quais citam-se as seguintes:

- É uma área que apresenta teores extremamente baixos de vários nutrientes (Ca, Mg, K, P, B e Zn), acidez excessiva e toxidez de Al.

- O valor da CTC efetiva de $2,05 \text{ cmol}_c / \text{dm}^3$ (extremamente baixo) reflete que este solo, sob condições naturais ácidas, apresenta baixa capacidade de reter cátions, mesmo tendo 20 g/kg de matéria orgânica e 600 g/kg de argila. Reflete ainda que as argilas deste solo são de baixa atividade, formadas provavelmente por caulinita e, ou, sesquióxidos de ferro e alumínio.

- Desta CTC efetiva, 73,2% dos postos de troca são ocupados pelo Al, o que certamente oferece sérias limitações ao crescimento das principais culturas.

- A baixa atividade das argilas deste solo pode ser confirmada pela observação do valor da CTC a pH 7,0, que atingiu apenas $5,75 \text{ cmol}_c / \text{dm}^3$, apesar de, em termos relativos à CTC efetiva, isto representar um aumento de 180%.

- O potencial de perdas por lixiviação é marcante sob condições naturais (baixa CTC efetiva), apesar do solo apresentar 600 g/kg de argila. Este

potencial de perdas pode ser sensivelmente reduzido por calagem adequada deste solo e a conseqüente geração de cargas dependentes de pH.

- O manejo adequado dos restos culturais, a adubação verde, a utilização de plantas de cobertura e a rotação de culturas deve merecer especial atenção nesta área, para aumentar a CTC e a retenção de umidade.

- 2) Considerando-se que um balanço teórico ideal para percentagem de saturação de cátions da CTC a pH 7,0 deveria ser: cálcio (60 -70%), magnésio (10 -20%), potássio (2-5%), hidrogênio (10 -15%) e outros (2-4%) que incluem ferro, manganês, cobre, zinco e sódio, como se comporta este solo, sob condições naturais, em relação aos três primeiros parâmetros? Comente os resultados.

$$\text{CTC a pH 7,0} = 5,75 \text{ cmol}_c / \text{dm}^3$$

$$\% \text{ Saturação por Ca} = \frac{100 \times \text{cmol}_c \text{ Ca} / \text{dm}^3}{\text{CTC a pH 7,0}}$$

$$= \frac{100 \times 0,4 \text{ cmol}_c \text{ Ca} / \text{dm}^3}{\text{CTC a pH 7,0}} = 6,9\%$$

$$\% \text{ Saturação por Mg} = \frac{100 \times \text{cmol}_c \text{ Mg} / \text{dm}^3}{\text{CTC a pH 7,0}}$$

$$= \frac{100 \times 0,1 \text{ cmol}_c \text{ Mg} / \text{dm}^3}{5,75 \text{ cmol}_c / \text{dm}^3} = 1,7\%$$

$$\% \text{ Saturação por K} = \frac{100 \times \text{cmol}_c \text{ K} / \text{dm}^3}{\text{CTC a pH 7,0}}$$

$$= \frac{100 \times 0,05 \text{ cmol}_c \text{ K} / 100 \text{ cm}^3}{5,75 \text{ cmol}_c / \text{dm}^3} = 0,9\%$$

Resposta: 6,9% de Ca, 1,7% de Mg e 0,9% de K da CTC a pH 7,0

Depreende-se desses cálculos um grande desbalanço em termos destes parâmetros. Dividindo-se o teor de cálcio ($0,4 \text{ cmol}_c / \text{dm}^3$) pelo de magnésio ($0,1 \text{ cmol}_c / \text{dm}^3$), observa-se que a relação Ca : Mg é de 4:1. Se o técnico deseja que esta relação seja mantida, é necessário que o calcário a ser utilizado também esteja próximo desta relação. A percentagem de saturação de potássio, também estando baixa, sugere a necessidade da aplicação de adubação potássica corretiva, a lançar, em área total neste solo.

3) Qual seria a dose de cloreto de potássio que este deveria receber, como adubação corretiva, a lanço, para ter 3% da CTC a pH 7,0 saturada com potássio?

$$\text{CTC a pH 7,0} = 5,75 \text{ cmol}_c / \text{dm}^3$$

$$\begin{aligned} 100\% &\rightarrow 5,75 \text{ cmol}_c / \text{dm}^3 \\ 3\% &\rightarrow X \text{ cmol}_c / \text{dm}^3 \end{aligned}$$

$$X = \frac{3\% \times 5,75 \text{ meq}/100 \text{ cm}^3}{100\%} = 0,17 \text{ cmol}_c \text{ K}/\text{dm}^3$$

Como a análise deste solo para potássio é de 20 mg K/dm³, o que corresponde a 0,05 cmol_c K/dm³, seria necessário adicionar:

$$0,17 \text{ cmol}_c \text{ K}/\text{dm}^3 - 0,05 \text{ cmol}_c \text{ K}/\text{dm}^3 = 0,12 \text{ cmol}_c \text{ K}/\text{dm}^3 \text{ de solo,}$$

para ter 3% da CTC a pH 7,0 (0,17 cmol_c/dm³) ocupada por K.

$$\begin{aligned} 1 \text{ cmol}_c \text{ K}/\text{dm}^3 &\rightarrow 0,39102 \text{ g K}/\text{dm}^3 \text{ (problema 1, pg. 20)} \\ 0,12 \text{ cmol}_c \text{ K}/\text{dm}^3 &\rightarrow X \text{ g K}/\text{dm}^3 \text{ (A)} \end{aligned}$$

$$\text{(A) Tabela 7A: cmol}_c \text{ K}/\text{dm}^3 \rightarrow \text{g K}/\text{dm}^3 = \text{cmol}_c \text{ K}/\text{dm}^3 \times 0,3909$$

$$\text{ou } X = \frac{0,12 \text{ cmol}_c \text{ K}/\text{dm}^3 \times 0,39102 \text{ g K}/\text{dm}^3}{1 \text{ cmol}_c \text{ K}/\text{dm}^3} = 0,047 \text{ g K}/\text{dm}^3$$

Transformando-se em g/ha e considerando-se a profundidade de 20 cm e densidade do solo = 1,0 kg/dm³

$$\begin{aligned} 0,047 \text{ g K} &\rightarrow 1 \text{ dm}^3 \\ X \text{ g K} &\rightarrow 2.000.000 \text{ dm}^3 \text{ (B)} \end{aligned}$$

$$\text{(B) Tabela 6A; g K}/\text{dm}^3 \rightarrow \text{kg K}/\text{ha} = \text{g K}/\text{dm}^3 \times 2.000$$

$$\text{ou } X = \frac{2.000.000 \text{ dm}^3 \times 0,047 \text{ g K}}{1 \text{ dm}^3} = 94.000 \text{ g K}/\text{ha} \text{ ou } 94 \text{ kg K}/\text{ha}$$

Transformando em kg K₂O/ha e, posteriormente, em kg KCl/ha, obtém-se, utilizando-se os respectivos pesos atômicos para potássio = 39,102 e para oxigênio = 15,999:

$$\begin{aligned} \text{K}_2 &\rightarrow \text{K}_2\text{O} \\ (39,102 \times 2) &\rightarrow (39,102 \times 2) + 15,999 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 78,204 \text{ kg K} &\rightarrow 94,203 \text{ kg de K}_2\text{O} \\ 94 \text{ kg K}/\text{ha} &\rightarrow X \text{ kg K}_2\text{O}/\text{ha} \text{ (C)} \end{aligned}$$

(C) Tabela 7A: kg K/ha → kg K₂O/ha = kg K/ha x 1,20458

$$\text{ou } X = \frac{94 \text{ kg K/ha} \times 94,203 \text{ kg K}_2\text{O}}{78,204 \text{ kg K}} = 113,2 \text{ kg K}_2\text{O/ha}$$

Como a percentagem de K₂O no cloreto de potássio é de 58%, teremos:

$$\begin{aligned} 100 \text{ kg de KCl} &\rightarrow 58 \text{ kg de K}_2\text{O} \\ X \text{ kg de KCl} &\rightarrow 113,2 \text{ kg de K}_2\text{O} \end{aligned}$$

$$X = \frac{113,2 \text{ kg K}_2\text{O} \times 100 \text{ kg KCl}}{58 \text{ kg K}_2\text{O}} = 195,2 \text{ kg KCl/ha}$$

Resposta: 195,2 kg de KCl/ha

4) Sendo a meta do agricultor elevar o teor de matéria orgânica neste solo a 30 g/kg, e havendo na propriedade esterco de curral (35% de matéria orgânica) em abundância, quantas toneladas deste devem ser incorporadas na camada de 0 a 20cm?

Passar de 20 g/kg de matéria orgânica para 30 g/kg significa aumentar 10 g/kg.

$$10 \text{ g/kg} = 10 \text{ g}/1.000\text{g} = 10 \text{ kg}/1.000\text{kg} = 10 \text{ t}/1.000 \text{ t (A)}$$

(A) Tabela 6A: g/kg → t/ha = g/kg x 2

$$1 \text{ ha na camada de 0 a 20 cm} = 10.000 \text{ m}^2 \times 0,20 \text{ m} = 2.000 \text{ m}^3$$

Considerando-se a densidade do solo = 1,0 obtém-se que 1 ha na camada de 0 a 20 cm = 2.000 m³ x 1 = 2.000 t.

$$\begin{aligned} 10 \text{ t de matéria orgânica} &\rightarrow 1.000 \text{ t de solo} \\ X \text{ t de matéria orgânica} &\rightarrow 2.000 \text{ t de solo} \end{aligned}$$

$$X = \frac{2.000 \text{ t de solo} \times 10 \text{ t de matéria orgânica}}{1.000 \text{ t de solo}}$$

$$X = 20 \text{ t de matéria orgânica}$$

Como o esterco tem 35% de matéria orgânica:

$$\begin{aligned} 100 \text{ t de esterco} &\rightarrow 35 \text{ t de matéria orgânica} \\ X \text{ t de esterco} &\rightarrow 20 \text{ t de matéria orgânica} \end{aligned}$$

X = 57,1 t de esterco de curral,

Resposta: 57,1 t de esterco de curral/ha

5) Admitindo-se que, próximo a esta área somente exista a disponibilidade de calcário calcítico (55% CaO) e, a cerca de 300 km, encontra-se à venda dolomita calcinada (27% CaO e 19% MgO), qual seria a combinação ideal destes produtos para que esta área, após a calagem, mantivesse a relação original de Ca : Mg de 4:1, em $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$, admitindo-se que esta é a melhor opção sob aspectos técnicos e econômicos?

Para responder a esta pergunta, é necessário, inicialmente, calcular por unidade de peso destes dois produtos, quantos cmol_c de cálcio e magnésio estariam sendo aplicados por hectare, considerando-se o volume de 2.000 m^3 (camada 0 a 20 cm e área 10.000 m^2).

Com a finalidade de obter valores de referência para o cálculo, deve-se estimar:

- a) Para cada 1% de CaO no produto, a quantos cmol_c de Ca corresponderia a aplicação de 1 tonelada?
- b) Para cada 1% de MgO no produto, a quantos cmol_c de Mg corresponderia a aplicação de 1 tonelada?

a) 1% CaO → 1 kg de CaO/100 kg de calcário → 10 kg de CaO/1.000 kg de calcário.

Transformando CaO → Ca, obtém-se (A):

(A) Tabela 7A: kg CaO → kg Ca = kg CaO x 0,7147

ou pelos respectivos pesos atômicos $40,08 + 15,999 \rightarrow 40,08$

56,079 kg CaO → 40,08 kg Ca
10,00 kg CaO → X kg Ca

$$X = \frac{40,08 \text{ kg Ca} \times 10,00 \text{ kg CaO}}{56,079 \text{ kg CaO}} = 7,14706 \text{ kg Ca ou } 7.147,0603 \text{ g Ca}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ cmol}_c \text{ Ca} &= \text{peso atômico (g)} \div \text{valência} \div 100 \\ &= 40,08 \div 2 \div 100 \end{aligned}$$

1 cmol_c Ca → 0,2004 g Ca
X cmol_c Ca → 7.147,0603 g Ca (B)

(B) Tabela 7A: g Ca → cmol_c Ca = g Ca x 4,9900

7,147,0603 g Ca x 1 cmol_c Ca

$$\text{ou } X = \frac{\quad}{0,02004 \text{ g Ca}} ; X = 35.663,973 \text{ cmol}_c \text{ Ca}$$

Portanto: para cada 1% de CaO em um calcário, a aplicação de 1 t/ha corresponderia a 35.663,973 cmol_c Ca/ha.

b) 1% MgO → 1 kg de MgO/100 kg de calcário → 10 kg de MgO/1.000 kg de calcário

Transformando MgO → Mg, obtém-se:

$$24,312 + 15,999 \rightarrow 24,312$$

$$40,311 \text{ kg MgO} \rightarrow 24,312 \text{ kg Mg}$$

$$10,00 \text{ kg MgO} \rightarrow X \text{ kg Mg (C)}$$

(C) Tabela 7A: kg MgO → kg Mg = kg MgO x 0,60311

$$\text{ou } X = \frac{24,312 \text{ kg Mg} \times 10,00 \text{ kg MgO}}{40,311 \text{ kg Mg}} = X = 6,031108 \text{ kg Mg}$$

$$\text{ou } X = 6.031,108 \text{ g Mg}$$

$$1 \text{ cmol}_c \text{ Mg} = \frac{\text{peso atômico (g)}}{24,312} \div \frac{\text{valência}}{2} \div 100$$

$$1 \text{ cmol}_c \text{ Mg} \rightarrow 0,012156 \text{ g Mg}$$

$$X \text{ cmol}_c \text{ Mg} \rightarrow 6.031.108 \text{ g Mg (A)}$$

(A) Tabela 7A: g Mg → cmol_c Mg = g Mg x 8,2304

$$\text{ou } X = \frac{6.031,108 \text{ g Mg} \times 1 \text{ cmol}_c \text{ Mg}}{0,12156 \text{ g Mg}} ; X = 49.142,48 \text{ cmol}_c \text{ Mg/ha}$$

Portanto: para cada 1% de MgO em um calcário, a aplicação de 1 t/ha corresponde a 49.614,248 cmol_c Mg/ha.

Como este calcário calcítico apresenta 55% de CaO, a aplicação de 1.000 kg do mesmo corresponde a fornecer 35.663,973 cmol_c Ca x 55 = 1.961.518,515 cmol_c Ca/ha.

Considerando-se que um hectare, na camada de 0 a 20 cm, corresponde a 2.000.000 dm³, obtém-se por dm³ o seguinte:

$$1.961.518,515 \text{ cmol}_c \text{ Ca} \rightarrow 2.000.000 \text{ dm}^3 \text{ (1 ha)}$$

$$X \text{ cmol}_c \text{ Ca} \rightarrow 1 \text{ dm}^3$$

$$X = \frac{100 \text{ cm}^3 \times 1.961.518,515 \text{ cmol}_c \text{ Ca}}{2.000.000 \text{ dm}^3} ; X = 0,98 \text{ cmol}_c \text{ Ca/dm}^3$$

Isto, em outras palavras, significa que a aplicação de 1 tonelada deste calcário implicaria em fornecer 0,98 cmol_c Ca/dm³.

O mesmo raciocínio deve ser feito em relação à dolomita calcinada., qual seja, como este produto apresenta 27% de CaO e 19% de MgO, a aplicação de 1.000 kg por hectare corresponderia a fornecer:

$$\begin{aligned} 35.663,9 \text{ cmol}_c \text{ Ca/ha} \times 27,0\% &= 962.927,2 \text{ cmol}_c \text{ Ca/ha} \\ 49.614,2 \text{ cmol}_c \text{ Mg/ha} \times 19,0\% &= 942.670,7 \text{ cmol}_c \text{ Mg/ha} \end{aligned}$$

Transformando-se em cmol_c /dm³, como explicado anteriormente:

$$\begin{aligned} 962.970,7 \text{ cmol}_c \text{ Ca} &\rightarrow 2.000.000 \text{ dm}^3 \\ X \text{ cmol}_c \text{ Ca} &\rightarrow 1 \text{ dm}^3 \end{aligned}$$

$$X = 0,48 \text{ cmol}_c \text{ Ca/dm}^3$$

$$\begin{aligned} 942.670,7 \text{ cmol}_c \text{ Mg} &\rightarrow 2.000.000 \text{ dm}^3 \\ X \text{ cmol}_c \text{ Mg} &\rightarrow 1 \text{ dm}^3 \end{aligned}$$

$$X = 0,47 \text{ cmol}_c \text{ Mg/dm}^3$$

Isto, em outras palavras, significa que a aplicação de 1 tonelada desta dolomita implicaria em fornecer 0,48 cmol_c Ca/dm³ e 0,47 cmol_c Mg/dm³.

Para manter a relação Ca: Mg de 4:1 (em cmol_c), partindo destes produtos, teriam que se aplicados 0,47 cmol_c Mg/dm³ e 4 vezes este nível de cmol_c Ca/dm³, ou seja, 1,88 cmol_c Ca/dm³.

Como ao aplicar 1 tonelada de dolomita calcinada fornece-se 0,47 cmol_c Mg/dm³ mais 0,48 cmol_c Ca/dm³, ficam faltando 1,40 cmol_c Ca/dm³ que deverão ser supridos pelo calcário calcítico, segundo os cálculos seguintes:

$$\begin{aligned} 1.000 \text{ kg de calcário calcítico (55\% CaO)} &\rightarrow 0,98 \text{ cmol}_c \text{ Ca/dm}^3 \\ X \text{ kg de calcário calcítico (55\% CaO)} &\rightarrow 1,40 \text{ cmol}_c \text{ Ca/dm}^3 \end{aligned}$$

$$X = 1.429 \text{ kg de calcário calcítico}$$

Conseqüentemente, qualquer mistura de 1,43 partes deste calcário calcítico com 1 parte desta dolomita calcinada atende à especificação do problema.

Para orientação na solução de outros problemas dessa natureza, podem ser adotadas as seguintes constantes:

- a) Para cada 1% de CaO em um produto, quando se aplica 1 tonelada por hectare, incorporada na camada de 0 a 20 cm, adiciona-se o equivalente a $0,01783 \text{ cmol}_c \text{ Ca}^{2+}/\text{dm}^3$.
- b) Para cada 1% de MgO em um produto, quando se aplica 1 tonelada por hectare, incorporada na camada de 0 a 20 cm, adiciona-se o equivalente a $0,0248 \text{ cmol}_c \text{ Mg}^{2+}/\text{dm}^3$.

6) Admitindo-se que cerca de 80% do fósforo aplicado a este solo seria “fixado” a curto prazo (embora este índice seja dependente de uma série de fatores: cultura, solo e manejo), e desejando-se atingir um teor de $10 \text{ mg P}/\text{dm}^3$ na análise de solo pelo método do duplo ácido (Mehlich), após a ocorrência deste fenômeno, que dose de superfosfato simples (18% P_2O_5) seria recomendável para aplicação a lanço e incorporação na camada de 0 a 20 cm, como adubação fosfatada corretiva?

Para passar de $1 \text{ mg P}/\text{dm}^3$ para $10 \text{ mg P}/\text{dm}^3$, na análise, seriam necessários $9 \text{ mg P}/\text{dm}^3$.

$9 \text{ mg P}/\text{dm}^3$ transformados em kg/ha: (A)

$$(A) \text{ Tabela 6A: } \text{mg}/\text{dm}^3 \rightarrow \text{kg}/\text{ha} = \text{mg}/\text{dm}^3 \times 2$$

$$\begin{aligned} \text{ou } 9 \text{ mg P} &\rightarrow 1 \text{ dm}^3 \text{ solo} \\ X \text{ mg P} &\rightarrow 2.000.000 \text{ dm}^3 \text{ solo} \end{aligned}$$

$$X = \frac{2.000.000.000 \text{ dm}^3 \text{ solo} \times 9 \text{ mg de P}}{1 \text{ dm}^3 \text{ solo}} = 18.000.000 \text{ mg P ou } 18 \text{ kg P/ha}$$

Transformando kg de P em kg de P_2O_5 (A)

$$(A) \text{ Tabela 7A: } \text{kg P} \rightarrow \text{kg P}_2\text{O}_5 = \text{kg P} \times 2,29136$$

$$\begin{aligned} \text{ou } 2 \text{ P} &\rightarrow \text{P}_2\text{O}_5 \\ 2 \times 30,974 &\rightarrow 2 \times 30,974 + 5 \times 15,999 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 61,948 \text{ kg P} &\rightarrow 141,943 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \\ 18 \text{ kg P} &\rightarrow X \text{ kg P}_2\text{O}_5 \end{aligned}$$

$$X = \frac{18 \times 141,943}{61,948} ; X = 41,24 \text{ kg P}_2\text{O}_5$$

Seriam, portanto, necessários 41,24 kg de P₂O₅ na forma de superfosfato simples, se a eficiência fosse 100%; como a eficiência é apenas 20% (80% é fixado), a necessidade real será:

$$\begin{aligned} 41,24 \text{ kg P}_2\text{O}_5 &\rightarrow 20\% \\ X \text{ kg P}_2\text{O}_5 &\rightarrow 100\% \end{aligned}$$

$$X = \frac{100\% \times 41,24 \text{ kg P}_2\text{O}_5}{20\%} ; X = 206,1 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}$$

$$\begin{aligned} \text{Como } 100 \text{ kg supersimples (SS)} &\rightarrow 18 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \\ X \text{ kg supersimples (SS)} &\rightarrow 206,1 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \end{aligned}$$

$$X = \frac{206,1 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \times 100 \text{ kg S.S.}}{18 \text{ kg P}_2\text{O}_5} ; X = 1.145 \text{ kg S.S./ha}$$

Resposta: seria necessária a aplicação de 1.145 kg de superfosfato simples por hectare, como adubação fosfatada corretiva.

7) Supondo-se que, próximo a esta área, existam as opções de corretivos mostradas na tabela a seguir, qual seria a decisão mais correta sob os aspectos técnicos e econômicos, com o objetivo de, pela prática da calagem, manter a mesma relação original de 4:1 em termos de cmol_c de Ca e Mg?

Calcário	CaO	MgO	PN	RE	PRNT	Preço no moinho	Distância	Preço de transporte
	-----%-----					R\$/t	km	R\$/t
X	55	< 1	80	80	64	8,00	20	2,00
Y	36	10	80	80	64	12,00	120	12,00
Z	43	14	140	100	140	56,00	360	36,00

X = calcário calcítico; Y = calcário magnesiano; Z = calcário calcinado

Na tomada de decisão, sob os aspectos técnicos e econômicos, em relação à escolha do (s) corretivo (s) a ser (em) usado (s) na calagem, deve-se levar em conta: a) a análise química do corretivo; b) o Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT); c) o preço por tonelada efetiva (posto na propriedade) e d) a reatividade (RE) no caso de se querer estender o seu efeito residual. Mais detalhes sobre o assunto podem ser encontrados no Boletins Técnicos n° 1 (Acidez do Solo e Calagem) e n° 6 (Corretivos da Acidez dos Solos: Características e Interpretações Técnicas), publicados pela ANDA Associação Nacional para Difusão de Adubos.

Para se obter o preço por tonelada efetiva, que nada mais é do que o preço do corretivo levando-se em conta o Poder de Neutralização (PN), que avalia a característica química do produto, e a Reatividade (RE), que pondera a característica física (grau de moagem) do produto, os quais determinam o

Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT), e o preço posto na propriedade, basta fazer o seguinte cálculo:

$$\text{Preço por tonelada efetiva} = \frac{\text{Preço na propriedade} \times 100}{\text{PRNT}}$$

$$\begin{aligned} \text{Calcário X} &= \text{Preço no moinho (R\$ 8,00/t)} + \text{preço do transporte (R\$ 2,00/t)} \\ &= \text{R\$ 10,00/t na propriedade} \end{aligned}$$

$$\text{Preço por tonelada efetiva} = \frac{\text{R\$ 10,00/t} \times 100}{64} = \text{R\$ 15,62/t}$$

$$\begin{aligned} \text{Calcário Y} &= \text{Preço no moinho (R\$ 12,00/t)} + \text{preço do transporte} \\ &(\text{R\$ 12,00/t}) = \text{R\$ 24,00/t na propriedade} \end{aligned}$$

$$\text{Preço por tonelada efetiva} = \frac{\text{R\$ 24,00} \times 100}{64} = \text{R\$ 37,50/t}$$

$$\begin{aligned} \text{Calcário Z} &= \text{Preço no moinho (R\$ 56,00/t)} + \text{preço do transporte} \\ &(\text{R\$ 36,00/t}) = \text{R\$ 92,00/t na propriedade} \end{aligned}$$

$$\text{Preço por tonelada efetiva} = \frac{\text{R\$ 92,00/t} \times 100}{140} = \text{R\$ 65,71/t}$$

O próximo passo seria a escolha dos corretivos em função do preço por tonelada efetiva, o que não deixa dúvida quanto ao calcário X como fonte de cálcio e o calcário Y como fonte de cálcio e magnésio, por apresentarem preços por tonelada efetiva de R\$ 12,50 e R\$ 30,00, em comparação com o calcário Z que apresentou R\$ 65,71 por tonelada efetiva.

A partir desta decisão estima-se, pelo uso das constantes da página 27, quantos cmol_c de cálcio e magnésio seriam fornecidos pela aplicação de 1 tonelada do calcário Y por hectare.

$$\begin{aligned} 10\% \text{ de MgO} \times 0,02480 &= 0,248 \text{ cmol}_c \text{ Mg/dm}^3 \\ 36\% \text{ de CaO} \times 0,01783 &= 0,642 \text{ cmol}_c \text{ Ca/dm}^3 \end{aligned}$$

Para se manter a relação Ca: Mg de 4:1, tomando-se como base 1 tonelada por hectare de calcário Y, seria necessário $0,248 \text{ cmol}_c \text{ Mg/dm}^3$ e 4 vezes este nível em $\text{cmol}_c \text{ Ca/dm}^3$, ou seja, $0,992 \text{ cmol}_c \text{ Ca/dm}^3$.

Como ao aplicar 1 tonelada do calcário Y adiciona-se $0,248 \text{ cmol}_c \text{ Mg/dm}^3$ mais $0,642 \text{ cmol}_c \text{ Ca/dm}^3$, ficam faltando $0,35 \text{ cmol}_c \text{ Ca/dm}^3$ que deverão ser supridos pelo calcário X, segundo os cálculos seguintes:

$$1 \text{ t do calcário X (55\% de CaO)} \times 0,01783 = 0,980 \text{ cmol}_c \text{ Ca/dm}^3$$

1 t calcário X (55% CaO) → 0,98 cmol_c Ca/dm³
X t calcário X (55% CaO) → 0,35 cmol_c Ca/dm³

$$X = \frac{0,35 \text{ cmol}_c \text{ Ca/dm}^3 \times 1 \text{ t calcário X (55\% CaO)}}{0,98 \text{ cmol}_c \text{ Ca/dm}^3}$$

X = 0,357 t de calcário calcítico

Conseqüentemente, qualquer mistura de 1 parte do calcário Y com 0,357 partes do calcário X atende à especificação do problema.

8) Admitindo-se que esta amostra seja de uma área de cerrado recém-desbravado e que se destine ao plantio de soja, analisar os seguintes aspectos:

- a) seria recomendável uma adubação fosfatada corretiva nesta área para a produção máxima econômica?
- b) Qual seria a dose de fertilizante fosfatado solúvel, neste caso, com base no teor de argila?

a) A tomada de decisão, para o uso ou não da adubação fosfatada corretiva depende de uma série de fatores, dentre os quais destacam-se a cultura a ser feita, a disponibilidade de recursos do agricultor, o regime de posse da terra, o período em anos para “construir” a fertilidade do solo, o planejamento futuro do uso da terra e o teor de fósforo disponível no solo.

Admitindo-se que a cultura da soja comporte esta prática, que o agricultor disponha de recursos para adoção da mesma e que ele pretenda continuar utilizando a área para produção de grãos, três fatores são fundamentais para consideração neste caso: o período em anos para “construir” a fertilidade do solo, o teor de fósforo disponível no solo e o teor de argila.

Sob aspectos de disponibilidade de fósforo no solo, esta prática tem sido recomendada para solos argilosos com teores muito baixos, baixos ou médios em P pelo extrator Mehlich-1 ou Resina. **(Ver tabelas 1A a 5A - Apêndice)**. Observando-se os resultados da análise mostrados na página 19, esta área se enquadraria dentro deste critério, para a tomada de decisão.

Em termos de período em anos para a “construção” da fertilidade destes solos, a meta de se atingir a produção máxima econômica em 3 a 4 anos justificaria o uso da adubação fosfatada corretiva, dada a extrema deficiência de fósforo neste solo.

Portanto, partindo dos aspectos citados, seria justificável o uso da adubação fosfatada corretiva nesta área como um investimento para obtenção de produções adequadas no período proposto.

b) Para se estabelecer a dose de adubação fosfatada corretiva, têm sido obtidos excelentes resultados com a utilização, para culturas anuais, de 3 a 10 kg de P_2O_5 solúvel para cada 1% (10 g/kg) de argila; em geral, para se atingirem os tetos de produção, em 3 a 4 anos, utilizam-se 4 kg de P_2O_5 solúvel por hectare/1% de argila. Com estes elementos, pode-se calcular a dose de adubação fosfatada corretiva, como se mostra a seguir:

4 kg de P_2O_5 solúvel → 1% de argila
X kg de P_2O_5 solúvel → 60% de argila

$$X \text{ kg de } P_2O_5 \text{ solúvel} = \frac{60\% \text{ de argila} \times 4 \text{ kg de } P_2O_5 \text{ solúvel}}{1\% \text{ de argila}}$$

$$X = 240 \text{ kg de } P_2O_5/\text{ha}$$

Portanto, a recomendação da adubação fosfatada corretiva seria de 240 kg de P_2O_5 solúvel, sendo a tomada de decisão, sobre o fertilizante a ser usado, ditada por aspectos técnicos e econômicos.

Para maior eficiência desta prática deve-se ressaltar a necessidade de uma calagem prévia e adequada, em geral feita com um mínimo de 90 dias de antecedência.

6. REPRESENTAÇÃO E CONVERSÃO DOS RESULTADOS DE ANÁLISES DE ROTINA PARA AVALIAÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO.

6.1. Expressão dos resultados

Os resultados das análises de solos são, em geral, apresentados nas seguintes unidades: $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$, $\text{mmol}_c/\text{dm}^3$, mg/dm^3 . As representações $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ e, ou, $\text{mmol}_c/\text{dm}^3$ são mais usadas para o caso dos íons (cátions e ânions) trocáveis e para expressar parâmetros de CTC, explicados anteriormente. Isto é totalmente justificável, pois o fenômeno de troca de cátions leva em consideração o conceito de mol por unidade de carga (ou equivalência) e não conceito de unidade de peso em valor absoluto.

A expressão usual miligramas por decímetro cúbico (mg/dm^3) é geralmente utilizada nas análises de micronutrientes, muito embora, na maioria dos laboratórios, seja também utilizada para apresentar os teores de fósforo, potássio e enxofre.

Porcentagem (%) em peso é a porção do constituinte em cem partes da amostra. Esta unidade é normalmente utilizada para expressar resultados de saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%). Os teores de matéria orgânica e dos componentes da fração mineral do solo (argila, silte e areia) são, em geral, expressos em g/kg, pois neste caso, as amostras são

pesadas e não medidas em volume como no caso das análises para avaliação da fertilidade do solo. Alguns laboratórios expressam o teor de matéria orgânica em decagrama/quilo (dag/kg) que equivale, em valor numérico, à antiga identificação de percentagem (%).

6.2. Transformações de unidades

Muitas vezes, os resultados da análise de solo, expressos em $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$, $\text{mmol}_c/\text{dm}^3$, mg/dm^3 , g/kg , etc, não transmitem a muitos técnicos e, principalmente aos agricultores sob sua orientação, uma idéia “quantitativa relativa” da disponibilidade de um nutriente. Um resultado de análise de fósforo em mg/dm^3 passa a ter mais sentido quando se transforma este resultado em quantos kg de P_2O_5 estão disponíveis por hectare, por exemplo. Da mesma forma, pode ser interessante conhecer quantos cmol_c de Ca/dm^3 , correspondem ao uso de 3 toneladas/ha de um determinado calcário.

Para facilitar estes tipos de cálculo e uma série de outros de cunho extremamente prático, existem tabelas de transformações de unidades que, quando operadas adequadamente, permitem reduzir consideravelmente o tempo gasto na solução destes problemas (**Tabelas 6A e 7A**).

A **Tabela 6A** apresenta fatores multiplicativos para transformação de resultados analíticos envolvendo $\text{g}/100 \text{ g}$, g/kg , mg/dm^3 , kg/ha e t/ha .

A **Tabela 7A** apresenta fatores de conversão envolvendo cmol_c , gramas na forma elementar, óxido e radical para nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre.

Alguns exemplos adicionais de cálculos utilizando estas tabelas são apresentados a seguir.

1) Uma análise de solo apresentou o resultado de $0,54 \text{ cmol}_c \text{ K}/\text{dm}^3$. Pergunta-se: a) Este resultado equivale a quantos $\text{mg K}/\text{dm}^3$ de potássio? B) A quantos kg/ha de KCl (58% de K_2O) este resultado equivale?

a) Primeiro transforma-se $\text{cmol}_c \text{ K}/\text{dm}^3$ de potássio em $\text{mg K}/\text{dm}^3$. Pela tabela 7A, para transformar cmol_c de K em g de K, basta multiplicar por 0,3909, portanto:

$$0,54 \text{ cmol}_c \text{ K}/\text{dm}^3 \times 0,3909 = 0,2111 \text{ g K}/\text{dm}^3$$

Pela tabela 6A, para transformar g/dm^3 em mg/dm^3 multiplicar por 1.000

$$0,2111 \text{ g K}/\text{dm}^3 \times 1.000 = 211,1 \text{ mg}/\text{dm}^3$$

b) Pela tabela 6A, para transformar mg/dm^3 em kg/ha , multiplicar por 2.

$$211,1 \text{ mg K}/\text{dm}^3 \times 2 = 422,2 \text{ kg K}/\text{ha}.$$

(considerando-se 1 ha, na camada de 0 a 20 cm)

Como o KCl apresenta 58% de K₂O, é necessário primeiro transformar K em K₂O, pelo uso do fator de multiplicação 1,20458 (tabela 7A).

$$422,2 \text{ kg K/ha} \times 1,20458 = 508,6 \text{ kg de K}_2\text{O/ha}$$

$$\begin{aligned} 100 \text{ kg de KCl} &\rightarrow 58 \text{ kg de K}_2\text{O} \\ X \text{ kg de KCl} &\rightarrow 508,6 \text{ kg de K}_2\text{O} \end{aligned}$$

$$X = \frac{508,6 \text{ kg de K}_2\text{O} \times 100 \text{ kg de KCl}}{58 \text{ kg de K}_2\text{O}} = 876,9 \text{ kg de KCl}$$

Portanto, uma análise de solo que apresente 0,54 cmol_c K/dm³ corresponde a uma disponibilidade de 876,9 kg de KCl/ha.

2) A aplicação de 4 toneladas de calcário/ha (CaO = 40%; MgO = 8%) corresponderia a quantos cmol_c Ca²⁺/dm³ e de Mg²⁺/dm³?

$$\begin{aligned} 100 \text{ kg de calcário} &\rightarrow 40 \text{ kg de CaO} \\ 4.000 \text{ kg de calcário} &\rightarrow X \text{ kg de CaO} \end{aligned}$$

$$X \text{ kg de CaO} = \frac{4.000 \text{ kg de calcário} \times 40 \text{ kg de CaO}}{100 \text{ kg de calcário}} = 1.600 \text{ kg de CaO}$$

$$\begin{aligned} 100 \text{ kg de calcário} &\rightarrow 8 \text{ kg de MgO} \\ 4.000 \text{ kg de calcário} &\rightarrow X \text{ kg de MgO} \end{aligned}$$

$$X \text{ kg de MgO} = \frac{4.000 \text{ kg de calcário} \times 8 \text{ kg de MgO}}{100 \text{ kg de calcário}} = 320 \text{ kg de MgO}$$

Pela tabela 7A, transforma-se CaO e MgO em Ca e Mg, respectivamente, pelo uso dos fatores 0,71470 e 0,60311.

$$\begin{aligned} 1.600 \text{ kg de CaO/ha} \times 0,71470 &= 1.143,5 \text{ kg Ca/ha} \\ 320 \text{ kg de MgO/ha} \times 0,60311 &= 193,0 \text{ kg Mg/ha} \end{aligned}$$

Pela tabela 7A, transforma-se CaO e MgO em Ca e Mg, respectivamente, pelo uso dos fatores 0,71470 e 0,60311.

$$\begin{aligned} 1.143,5 \text{ kg Ca/ha} \times 0,71470 &= 1.143,5 \text{ kg Ca/ha} \\ 320 \text{ kg Mg/ha} \times 0,63311 &= 193,0 \text{ kg Mg/ha} \end{aligned}$$

Pela tabela 6A, para transformar kg Ca/ha e kg Mg/ha em mg Ca/dm³ e mg Mg/dm³, multiplicar por 0,5.

$$1.143,5 \text{ kg Ca/ha} \times 0,5 = 571,7 \text{ mg Ca/dm}^3 \text{ ou } 0,5717 \text{ g Ca/dm}^3$$

$$193,0 \text{ kg Mg/ha} \times 0,5 = 96,5 \text{ mg Mg/dm}^3 \text{ ou } 0,09655 \text{ g Mg/dm}^3$$

ou, utilizando-se as constantes mencionadas na página 27:

$$4 \text{ t} \times 40\% \text{ de CaO} \times 0,01783 \text{ cmol}_c \text{ Ca/dm}^3 = 2,85 \text{ cmol}_c \text{ Ca/dm}^3$$

$$4 \text{ t} \times 8\% \text{ de MgO} \times 0,02480 \text{ cmol}_c \text{ Mg/dm}^3 = 0,79 \text{ cmol}_c \text{ Mg/dm}^3$$

Resposta: 2,85 cmol_c Ca/dm³ e 0,79 cmol_c Mg/dm³.

7. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. Recomendações de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Passo Fundo, 3. ed. Passo Fundo, SBCS-Núcleo Regional Sul 1994. 224p.

LOPES, A.S.; SILVA, M. de C. & GUILHERME, L.R.G. Acidez do solo e calagem. ANDA, São Paulo. 1991. 22p. Boletim Técnico N^o 1.

RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G. & ALVAREZ V., V.H. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5^a aproximação. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. Viçosa, MG, 1999. 359p.

FASSBENDER, H.W. Química de suelos – com ênfasis en suelos de América Latina. San José, Costa Rica, Editorial IICA, Série: Libros y Materiales Educativos N^o 24, 1980. 398p.

KINJO, T. Conceitos de acidez dos solos. In: B. van Raij., (Coord.). Simpósio sobre Acidez e Calagem no Brasil, Sociedade Brasileira da Ciência do Solo, Campinas, SP, 1982, p. 23-31.

INSTITUTO DA POTASSA E DO FOSFATO. Manual internacional de fertilidade do solo. Tradução e adaptação de Alfredo Scheid Lopes. 2^a edição revisada e ampliada. Piracicaba, POTAFOS, 1998. 177p.

RAIJ, B. van. Avaliação da fertilidade do solo. Piracicaba, Instituto da Potassa & Fosfato, Instituto Internacional da Potassa, 1981. 142p.

RAIJ, B. van & QUAGGIO, J. A. Uso eficiente de calcário e gesso na agricultura. In: W. Espinoza e J. A. Jorge (ed.). Anais do Simpósio sobre Fertilizantes na Agricultura Brasileira, EMBRAPA – DEP, Documentos 14, Brasília, DF, 1984. p.323-346.

RAIJ, B. Van. ; CANTARELLA, H. ; QUAGGIO, J.A. & FURLANI, A.M.C. (eds.). Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas. Instituto Agrônomo & Fundação IAC, 1996. 285p. Boletim Técnico N^o 100.

RUSSEL, J. & RUSSEL, E.W. Soil conditions and plant growth. Longmans, Green and Co. London/New York/Toronto, 1968. 635 p.

SOUSA, D.M.G. de & LOBATO, E. (eds.). Cerrado : correção do solo e adubação. Planaltina, DF : Embrapa Cerrados, 2002. 416p.

VERDADE, F.C. Representação e conversão dos constituintes do solo, dos adubos e das cinzas das plantas. Campinas, Instituto Agrônômico, 1963. 16 p. Boletim N^o 71.

WIETHÖLTER, S. Revisão das recomendações de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Apresentado na IV Reunião Sul-Brasileira de Ciência do Solo, UFRGS, 14-16 de outubro de 2002

APÊNDICE

Tabela 1A. Critérios para interpretação de análises de solo (pH ⁽¹⁾) para fins de avaliação da fertilidade no estado de Minas Gerais, Fonte: Ribeiro et al., (eds), 1999.
pH em água (relação 1:2,5; TFSA: H₂O).

Classificação química						
Acidez			Neutro		Alcalinidade	
Muito elevada < 4,5	Elevada 4,5 - 5,0	Média 5,1 - 6,0	Fraca 6,1 - 6,9	7,0	Fraca 7,1 - 7,8	Elevada > 7,8
Classificação agrônômica ⁽²⁾						
Muito baixo < 4,5	Baixo 4,5 - 5,4	Bom 5,5 - 6,0		Alto 6,1 - 7,0	Muito alto > 7,0	

⁽¹⁾ pH em água (relação 1:2,5; TFSA:H₂O) ⁽²⁾ A qualificação utilizada indica adequado (Bom) ou inadequado (muito baixo e baixo ou alto e muito alto).

Tabela 1A. (continuação) Critérios para interpretação de análises de solo para fins de avaliação da fertilidade no estado de Minas Gerais: enxofre disponível ⁽¹⁾ de acordo com o valor de fósforo remanescente (P-rem). Fonte: Ribeiro et al., (eds), 1999.

P-rem mg/L	Classificação				
	Muito baixo	Baixo	Médio ⁽²⁾	Bom	Muito bom
	----- (mg/dm ³) ⁽³⁾ -----				
	Enxofre disponível (S)				
0 - 4	≤ 1,7	1,8 - 2,5	2,6 - 3,6	3,7 - 5,4	> 5,4
4 - 10	≤ 2,4	2,5 - 3,6	3,7 - 5,0	5,1 - 7,5	> 7,5
10 - 19	≤ 3,3	3,4 - 5,0	5,1 - 6,9	7,0 - 10,3	> 10,3
19 - 30	≤ 4,6	4,7 - 6,9	7,0 - 9,4	9,5 - 14,2	> 14,2
30 - 44	≤ 6,4	6,5 - 9,4	9,5 - 13,0	13,1 - 19,6	> 19,6
44 - 60	≤ 8,9	9,0 - 13,0	13,1 - 18,0	18,1 - 27,0	> 27,0

⁽¹⁾ Método Hoefft et al., 1973 (Ca(H₂PO₄)₂, 500 mg/L de P, em HOAc 2 mol/L). ⁽²⁾ Esta classe indica os níveis críticos de acordo com o valor de P-rem. ⁽³⁾ mg/dm³ = ppm (massa/volume).

Tabela 1A. (continuação) Critérios para interpretação de análises de solo para fins de avaliação da fertilidade no estado de Minas Gerais: matéria orgânica e para o complexo de troca catiônica. Fonte: Ribeiro et al., (eds), 1999.

Característica	Unidade ⁽¹⁾	Classificação				
		Muito baixo	Baixo	Médio ⁽²⁾	Bom	Muito bom
Matéria orgânica (M.O.) ⁽³⁾	dag/kg	≤ 0,70	0,71 - 2,00	2,01 - 4,00	4,01 - 7,00	> 7,00
Cálcio trocável (Ca ²⁺) ⁽⁴⁾	cmol _c /dm ³	≤ 0,40	0,41 - 1,20	1,21 - 2,40	2,41 - 4,00	> 4,00
Magnésio trocável (Mg ²⁺) ⁽⁴⁾	cmol _c /dm ³	≤ 0,15	0,16 - 0,45	0,46 - 0,90	0,91 - 1,50	> 1,50
Acidez trocável (Al ³⁺) ⁽⁴⁾	cmol _c /dm ³	≤ 0,20	0,21 - 0,50	0,51 - 1,00	1,01 - 2,00 ⁽¹¹⁾	>2,00 ⁽¹¹⁾
Soma de bases (SB) ⁽⁵⁾	cmol _c /dm ³	≤ 0,60	0,61 - 1,80	1,81 - 3,60	3,61 - 6,00	> 6,00
Acidez potencial (H+Al) ⁽⁶⁾	cmol _c /dm ³	≤ 1,00	1,01 - 2,50	2,51 - 5,00	5,01 - 9,00 ⁽¹¹⁾	>9,00 ⁽¹¹⁾
CTC efetiva (t) ⁽⁷⁾	cmol _c /dm ³	≤ 0,80	0,81 - 2,30	2,31 - 4,60	4,61 - 8,00	>8,00
CTC a pH 7,0 (T) ⁽⁸⁾	cmol _c /dm ³	≤ 1,60	1,61 - 4,30	4,31 - 8,60	8,61 - 15,00	>15,00
Saturação por Al ³⁺ (m%) ⁽⁹⁾	%	≤ 15,0	15,1 - 30,0	30,1 - 50,0	50,1 - 75,0 ⁽¹¹⁾	>75,0 ⁽¹¹⁾
Saturação por bases (V%) ⁽¹⁰⁾	%	≤ 20,0	20,1 - 40,0	40,1 - 60,0	60,1 - 80,0	>80,0

⁽¹⁾ dag/kg = % (massa/massa); cmol_c/dm³ = meq/100 cm³. ⁽²⁾ O limite superior desta classe indica o nível crítico. ⁽³⁾ Método Walkley & Black; M.O. = 1,724 x Carbono orgânico. ⁽⁴⁾ Método KCl 1 mol/L. ⁽⁵⁾ SB = Soma de bases. ⁽⁶⁾ H+Al: Acidez potencial, Método Ca(OAc)₂ 0,5 mol/L, pH 7. ⁽⁷⁾ t = CTC efetiva. ⁽⁸⁾ T = CTC a pH 7,0 ⁽⁹⁾ m % = Saturação por Al da CTC efetiva. ⁽¹⁰⁾ V % = Saturação por bases da CTC a pH 7,0. ⁽¹¹⁾ A interpretação destas características, nestas classes, deve ser alta e muito alta em lugar de bom e muito bom.

Tabella 1A. (continuação) Critérios para interpretação de análises de solo (pH) para fins de avaliação da fertilidade no estado de Minas Gerais: Fósforo de acordo com o teor de argila do solo ou do valor de fósforo remanescente (P-rem) e para o potássio disponível. Fonte: Ribeiro et al., (eds), 1999.

Característica	Classificação				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Bom	Muito bom
	----- (mg/dm ³) ⁽¹⁾ -----				
Argila (%)			Fósforo disponível (P) ⁽²⁾		
60 - 100	≤ 2,7	2,8 - 5,4	5,5 - 8,0 ⁽³⁾	8,1 - 12,0	> 12,0
35 - 60	≤ 4,0	4,1 - 8,0	8,1 - 12,0	12,1 - 18,0	> 18,0
15 - 35	≤ 6,6	6,7 - 12,0	12,1 - 20,0	20,1 - 30,0	> 30,0
0 - 15	≤ 10,0	10,1 - 20,0	20,1 - 30,0	30,1 - 45,0	> 45,0
P-rem ⁽⁴⁾ (mg/L)					
0 - 4	≤ 3,0	3,1 - 4,3	4,4 - 6,0 ⁽³⁾	6,1 - 9,0	> 9,0
4 - 10	≤ 4,0	4,1 - 6,0	6,1 - 8,3	8,4 - 12,5	> 12,5
10 - 19	≤ 6,0	6,1 - 8,3	8,4 - 11,4	11,5 - 17,5	> 17,5
19 - 30	≤ 8,0	8,1 - 11,4	11,5 - 15,8	15,9 - 24,0	> 24,0
30 - 44	≤ 11,0	11,1 - 15,8	15,9 - 21,8	21,9 - 33,0	> 33,0
44 - 60	≤ 15,0	15,1 - 21,8	21,9 - 30,0	30,1 - 45,0	> 45,0
			Potássio disponível (K) ⁽²⁾		
	≤ 15	16 - 40	41 - 70 ⁽⁵⁾	71 - 120	> 120

⁽¹⁾ mg/dm³ = ppm (massa/volume). ⁽²⁾ Método Mehlich-1. ⁽³⁾ Níveis críticos de acordo com o teor de argila ou com o valor do fósforo remanescente. ⁽⁴⁾ P-rem = Fósforo remanescente. ⁽⁵⁾ O limite superior desta classe indica o nível crítico.

Tabela 1A. (continuação) Critérios para interpretação de análises de solo para fins de avaliação da fertilidade no estado de Minas Gerais: Micronutrientes. Fonte: Ribeiro et al., (eds), 1999.

Micronutriente	Classificação				
	Muito baixo	Baixo	Médio ⁽¹⁾	Bom	Alto
	-----(mg/dm^3) ⁽²⁾ -----				
Zinco disponível (Zn) ⁽³⁾	$\leq 0,4$	0,5 - 0,9	1,0 - 1,5	1,6 - 2,2	$> 2,2$
Manganês disponível (Mn) ⁽³⁾	≤ 2	3 - 5	6 - 8	9 - 12	> 12
Ferro disponível (Fe) ⁽³⁾	≤ 8	9 - 18	19 - 30	31 - 45	> 45
Cobre disponível (Cu) ⁽⁴⁾	$\leq 0,3$	0,4 - 0,7	0,8 - 1,2	1,3 - 1,8	$> 1,8$
Boro disponível (B) ⁽⁴⁾	$\leq 0,15$	0,16 - 0,35	0,36 - 0,60	0,61 - 0,90	$> 0,90$

⁽¹⁾ O limite superior desta classe indica o nível crítico. ⁽²⁾ $\text{mg}/\text{dm}^3 = \text{ppm}$ (massa/volume). ⁽³⁾ Método Mehlich-1.

⁽⁴⁾ Método água quente.

Tabela 2A. Níveis de fertilidade para interpretação de análise de solos para o estado de São Paulo.
Fonte: Raij et al., (eds), 1996.

Atributos	-----Produção Relativa (%)-----				
	0 - 70	71 - 90	91 - 100	> 100	> 100
	-----Teores-----				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
Fósforo (P)	-----mg/dm ³ -----				
Florestais	0 - 2	3 - 5	6 - 8	9 - 16	> 16
Perenes	0 - 5	6 - 12	13 - 30	31 - 60	> 60
Anuais	0 - 6	7 - 15	16 - 40	41 - 80	> 80
Hortaliças	0 - 10	11 - 25	26 - 60	61 - 120	> 120
S-SO ₄ ²⁻	-	0 - 4	5 - 10	> 10	-
	-----mmol _c /dm ³ -----				
K ⁺ trocável	0,0 - 0,7	0,8 - 1,5	1,6 - 3,0	3,1 - 6,0	> 6,0
Ca ²⁺ trocável	-	0 - 3	4 - 7	> 7	-
Mg ²⁺ trocável	-	0 - 4	5 - 8	> 8	-
	-----mg/dm ³ -----				
Boro (B)	-	0 - 0,20	0,21 - 0,60	> 0,60	-
Cobre (Cu)	-	0 - 0,2	0,3 - 0,8	> 0,8	-
Ferro (Fe)	-	0 - 4	5 - 12	> 12	-
Manganês (Mn)	-	0 - 1,2	1,2 - 5,0	> 5,0	-
Zinco (Zn)	-	0 - 0,5	0,6 - 1,2	> 1,2	-
Acidez	Muito alta	Alta	Média	Baixa	Muito baixa
pH em CaCl ₂	Até 4,3	4,4 - 5,0	5,1 - 5,5	5,6 - 6,0	> 6,0
Sat. por bases	Muito baixa	Baixa	Média	Alta	Muito alta
V%	0 - 25	26 - 50	51 - 70	71 - 90	> 90

Notas: a) mmol_c/dm³ = cmol_c/dm³ x 10; mg/dm³ = ppm (massa/volume). b) Extratores: P, K, Ca, Mg = resina; S = fosfato de cálcio; B = água quente; Cu, Fe, Mn, Zn = DTPA.

Tabela 3A. Níveis de fertilidade do solo para interpretação agrônômica dos teores de matéria orgânica, de P e de K nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. (Fonte: Wiethölter, 2002).

Interpretação do teor no solo	Matéria orgânica	P Mehlich – 1					Solos alagados	P resina ⁽²⁾	K Mehlich-1
		Classe textural do solo ⁽¹⁾							
		1	2	3	4	5			
	-----%-----	-----mg/dm ³ -----							
Muito Baixo	≤ 2,5	≤ 2,0	≤ 3,0	≤ 4,0	≤ 6,0	≤ 8,0	-	≤ 5,0	≤ 20
Baixo	2,6 - 3,5	2,1 - 4,0	3,1 - 6,0	4,1 - 8,0	6,1 - 12,0	8,1 - 16,0	≤ 3,0	5,1 - 10,0	21 - 40
Médio ⁽³⁾	3,6 - 4,5	4,1 - 6,0	6,1 - 9,0	8,1 - 12,0	12,1 - 18,0	16,1 - 24,0	3,1 - 6,0	10,1 - 20,0	41 - 60
Alto	4,6 - 5,5	6,1 - 12,0	9,1 - 18,0	12,1 - 24,0	18,1 - 36,0	24,1 - 48,0	6,1 - 12,0	20,1 - 40,0	61 - 120
Muito Alto ⁽⁴⁾	> 5,5	> 12,0	> 18,0	> 24,0	> 36,0	> 48,0	> 12,0	> 40,0	> 120
Capacidade tampão do solo ⁽⁵⁾		30	20	15	10	7,5	-	1 - 2	2 - 4

⁽¹⁾ Classe 1: > 55% de argila e/ou solos Erexim, Durox, Vacaria, Santo Ângelo, Aceguá, Pouso Redondo, Boa Vista, etc.

Classe 2: 41 a 55% de argila e/ou solos Passo Fundo franco-argiloso e argiloso, Estação, Ciríaco, Associação Ciríaco-Charrua, São Borja, Oásis, Vila, Farrupilha, Rancho Grande, Içara, etc.

Classe 3: 26 a 40% de argila e/ou solos Passo Fundo franco-arenoso e arenoso, Júlio de Castilhos, São Jerônimo, Alto das Canas, São Gabriel, Canoinhas, Jacinto Machado, Lages, etc.

Classe 4: 11 a 25% de argila e/ou solos Cruz Alta, Tupanciretã, Rio Pardo, Camaquã, Bagé, Bexigoso, Pelotas, São Pedro, Santa Maria, Pinheiro Machado, etc.

Classe 5: ≤10% de argila e/ou solos Bom Retiro, Tuia, Vacacaí, etc.

⁽²⁾ Resina em lâmina, indicado para solos adubados com fosfatos naturais reativos nos últimos anos.

⁽³⁾ O nível crítico é o limite superior ao teor Médio. No caso de K e para valores de CTC superiores a 10 cmol_c/dm³, considerar que o nível crítico é superior a 60 mg K/dm³, podendo ser estimado pelo acréscimo de 5 mg K/dm³ para cada 1 cmol_c/dm³ de CTC, ou seja, quando a CTC é 14 cmol_c/dm³, o nível crítico desejado será 80 mg/dm³. Em consequência, no primeiro cultivo após a análise do solo, para solos com CTC superior a 10 cmol_c/dm³ e com teor de argila maior que 50 %, a dose de potássio das tabelas de recomendação deverá ser aumentada em 10 kg de K₂O/ha para cada 10 % a mais de argila.

⁽⁴⁾ Solos com teores muito acima dos teores “Muito Alto” de P e de K deverão receber quantidades de P₂O₅ e K₂O menores que as indicadas pelos valores de reposição das tabelas ou, então, quantidades proporcionais à exportação das culturas.

⁽⁵⁾ Kg P₂O₅ ou K₂O a aplicar por hectare (camada 17 a 20 cm) para aumentar na análise 1 mg de P ou de K/dm³ de solo.

Taberla 3A. (continuação). Níveis de fertilidade do solo para interpretação agrônômica de pH, Ca, Mg, Ca + Mg, S, Cu, Zn e B nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. (Fonte: CFS - RS/SC, 1994).

Atributos	Interpretação do teor no solo			
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto
pH em água	≤ 5	5,1 - 5,5	5,6 - 6,0	5,6 - 6,0
Ca	-	≤ 2,0	2,1 - 4,0	> 4,0
Mg	-	≤ 0,5	0,6 - 1,0	> 1,0
Ca + Mg	-	≤ 2,5	2,6 - 5,0	> 5,0
S	-	< 2,0	2,0 - 5,0	> 5,0 *
Cu	-	< 0,15	0,15 - 0,40	> 0,40
Zn	-	< 0,2	0,20 - 0,50	> 0,50
B	-	< 0,1	0,1 - 0,3	> 0,3

* 10 mg/dm³ para leguminosas e para culturas mais exigentes em enxofre (brássicas, liliáceas etc.);

% (m/v) = relação massa/volume; cmol_c/dm³ = centimol de carga por decímetro cúbico = me/100 mL ou me/dL;

mg/dm³ (miligrama por decímetro cúbico) = ppm (massa/volume).

Tabela 3A. (continuação). Níveis de fertilidade do solo para interpretação agrônômica de valores de saturação de bases, de cátions trocáveis em relação à CTC a pH 7,0, e níveis de H + Al, CTC a pH 7,0 e relação K/(Ca + Mg)^{1/2} nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. (Fonte: Wiethölter, 2002).

Interpretação	Ca	Mg	K	Bases	Al ⁽²⁾	H+Al	CTC ⁽¹⁾ a pH 7	K/(Ca + Mg) ^{1/2} *
	%				cmol _c /dm ³			
Muito baixa	< 20	< 5	< 0,5	< 25	< 5	< 2	< 5	-
Baixa	20 - 40	5 - 10	0,5 - 1,0	26 - 50	5 - 10	2 - 4	5 - 10	< 0,10
Média	40 - 60	10 - 15	1,0 - 2,0	51 - 70	10 - 20	4 - 6	10 - 20	0,10 - 0,15
Alta	> 60	> 15	> 2,0	> 70	> 20	> 6	> 20	> 0,15

Ca + Mg + K + H+Al, expressos em cmol_c/dm³. ⁽²⁾ Valor ideal. * Indicativo de que haveria resposta das culturas à aplicação de K quando < 0,13, mas pode resultar em estimativas da necessidade de aplicação de K muito altas em certos casos.

Tabela 4A. Limites de interpretação do nível de fertilidade adotados pelos laboratórios de análise de solo no Estado do Espírito Santo. Fonte: Dadalto & Fullin, 2001.

Parâmetro Analisado	Expressão	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
Fósforo (P)						
Textura argilosa	mg/dm ³	-	≤5,0	6 - 10	> 10	-
Textura média	mg/dm ³	-	≤10	11 - 20	> 20	-
Textura arenosa	mg/dm ³	-	≤20	21 - 30	> 30	-
Potássio	mg/dm ³	-	≤ 30	31 - 60	> 60	-
Cálcio	cmolc/ dm ³	-	≤ 1,5	1,6 - 4 0	> 4,0	-
Magnésio	cmolc/ dm ³	-	≤ 0,5	0,6 - 1,0	> 1,0	-
Enxofre	mg/dm ³	-	≤ 5	6 - 10	> 10	-
Alumínio	cmolc/ dm ³	-	≤ 0,3	0,4 - 1,0	> 1,0	-
Matéria orgânica	dag/ dm ³	-	≤ 1,5	1,6 - 3,0	> 3,0	-
Boro	mg/dm ³	-	≤ 0,3	0,4 - 0,6	> 0,6	-
Cobre	mg/dm ³	≤ 0,5	0,6 - 1,5	1,6 - 20,0	> 20,0	-
Ferro	mg/dm ³	≤ 20	21 - 31	32 - 200	> 200	-
Manganês	mg/dm ³	≤ 5	6 - 11	12 - 130	> 130	-
Zinco	mg/dm ³	≤ 4,0	4,1 - 6,9	7,0 - 40,0	> 40,0	-
Acidez potencial	cmolc/ dm ³	-	≤ 2,5	2,6 - 5,0	> 5,0	-
Soma de bases ⁽¹⁾	cmolc/ dm ³	-	≤ 2,0	2 ,1 - 5,0	> 5,0	-
CTC efetiva ⁽²⁾	cmolc/ dm ³	-	≤ 2,5	2,6 - 6,0	> 6,0	-
CTC a pH 7,0 ⁽³⁾	cmolc/ dm ³	-	≤ 4,5	4,6 - 10,0	> 10,0	-
Saturação por alumínio ⁽⁴⁾	%	-	≤ 20	21 - 40	41 - 6 0	> 60
Saturação por bases ⁽⁵⁾	%	≤ 25	26 - 50	51 - 70	71 - 90	> 90
		Acidez		Neutro	Alcalinidade	
pH em H ₂ O	Elevada	Média	Fraca		Fraca	Elevada
	≤ 5,0	5,1 - 5,9	6,0 - 6,9	7,0	7,1 - 7,8	> 7,8

⁽¹⁾ SB = Ca + Mg + K/390; ⁽²⁾ t = SB + Al; ⁽³⁾ T = SB + (H + Al); ⁽⁴⁾ m = Al/t; ⁽⁵⁾ V = SB/T x 100.

Tabela 5A. Critérios de interpretação de análises químicas para avaliação da fertilidade dos solos da região dos cerrados. (Para interpretação do fósforo ver Tabela 5A – Continuação).

Fonte: Adaptado de Sousa & Lobato, 2002.

Camada de 0 a 20 cm					
Atributo	Baixo	Médio	Adequado	Alto	Muito Alto
pH em água	≤ 5,1	5,2 a 5,5	5,6 a 6,3	6,4 a 6,6	≥ 6,7
pH em Ca Cl ₂	≤ 4,4	4,5 a 4,8	4,9 a 5,5	5,6 a 5,8	≥ 5,9
Ca (cmol _c /dm ³) ¹	< 1,5	-	1,5 a 7,0	> 7,0	-
Mg (cmol _c /dm ³) ¹	< 0,5	-	0,5 a 2,0	> 2,0	-

K (cmol _c /dm ³)					
Solos com CTC a pH 7,0 menor que 4 cmol _c /dm ³	≤ 15	16 a 30	31 a 40	> 40	-
Solos com CTC a pH 7,0 igual ou maior que 4 cmol _c /dm ³	≤ 25	26 a 50	51 a 80	> 80	-

CTC a pH 7,0 (T) (cmol _c /dm ³)					
Arenosa	< 3,2	3,2 a 4,0	4,1 a 6,0	> 6,0	-
Média	< 4,8	4,8 a 6,0	6,1 a 9,0	> 9,0	-
Argilosa	< 7,2	7,2 a 9,0	9,1 a 13,5	> 13,5	-
Muito Argilosa	< 9,6	9,6 a 12,0	12,1 a 18,0	> 18,0	-

Matéria orgânica (%)					
Arenosa	< 0,8	0,8 a 1,0	1,1 a 1,5	> 1,5	-
Média	< 1,6	1,6 a 2,0	2,1 a 3,0	> 3,0	-
Argilosa	< 2,4	2,4 a 3,0	3,1 a 4,5	> 4,5	-
Muito Argilosa	< 2,8	2,8 a 3,5	3,6 a 5,2	> 5,2	-

Saturação por bases (V %)	≤ 20	21 a 35	36 a 60	61 a 70	≥ 71
S (mg/dm ³) ¹	< 4	5 a 9	-	> 10	-
B (mg/dm ³) ²	< 0,2	0,3 a 0,5	-	> 0,5	-
Cu (mg/dm ³) ³	< 0,4	0,5 a 0,8	-	> 0,8	-
Mn (mg/dm ³) ³	< 1,9	2,0 a 5,0	-	> 5,0	-
Zn (mg/dm ³) ³	< 1,0	1,1 a 1,6	-	> 1,6	-
Satur. de K da CTC a pH 7,0 (%)	< 1	1 a 2	2 a 3	> 3	-
Relação Ca/Mg ⁴	< 2	-	2 a 10	> 10	-
Relação Ca + Mg/ K	< 10	10 a 19	20 a 30	> 30	-
Relação Ca/K	< 7	7 a 14	15 a 25	> 25	-
Relação Mg/K	< 2	2 a 4	5 a 15	> 15	-

¹ Extraído com Ca(H₂PO₄)₂ 0,01 mol/L em água (relação solo:solução extratora de 1:2,5). S = (teor na camada de 0 a 20 cm + teor na camada de 20 a 40 cm)/2. ² Extraído com água quente. ³ Extraído com extrator Mehlich-1. ⁴ As relações Ca:Mg devem estar no intervalo de 1:1 a um máximo de 10:1, respeitando-se sempre o teor mínimo de 0,5 cmol_c/dm³.

Camadas abaixo de 20 cm					
	Muito Baixo	Baixo	Adequado	Alto	Muito alto
Satur. por Al (valor m %)	< 20	-	-	20 a 60	> 60
Ca (cmol _c /dm ³)	< 0,1	0,1 a 0,5	> 0,5	-	-

Relação entre alguns parâmetros analíticos de solos do Cerrado, úteis para avaliação da coerência dos resultados de análise de solos

Saturação por bases	Saturação por alumínio	pH em água	pH em Ca Cl ₂
< 15	> 40	< 5,0	< 4,3
16 a 30	15 a 40	5,0 a 5,4	4,3 a 4,7
31 a 45	0 a 15	5,4 a 5,8	4,7 a 5,0
46 a 60	0	5,9 a 6,3	5,1 a 5,5
61 a 75	0	6,4 a 6,8	5,6 a 6,0

(continua)

Tabela 5A. (continuação). Critérios de interpretação de análises químicas de fósforo em sistemas de culturas anuais de sequeiro e irrigados na região dos cerrados. Fonte: Adaptado de Sousa & Lobato, 2000

Teor de argila (%)	Teor de P no solo, extrator Mehlich 1 – sistemas de sequeiro				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Adequado	Alto
	-----mg/dm ³ -----				
≤ 15	0 a 6,0	6,1 a 12,0	12,1 a 18,0	18,1 a 25,0	> 25,0
16 a 35	0 a 5,0	5,1 a 10,0	10,1 a 15,0	15,1 a 20,0	> 20,0
36 a 60	0 a 3,0	3,1 a 5,0	5,1 a 8,0	8,1 a 12,0	> 12,0
> 60	0 a 2,0	2,1 a 3,0	3,1 a 4,0	4,1 a 6,0	> 6,0
Teor de argila (%)	Teor de P no solo, extrator Mehlich 1 – sistemas irrigados				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Adequado	Alto
	-----mg/dm ³ -----				
≤ 15	0 a 12,0	12,1 a 18,0	18,1 a 25,0	25,1 a 40,0	> 40,0
16 a 35	0 a 10,0	10,1 a 15,0	15,1 a 20,0	20,1 a 35,0	> 35,0
36 a 60	0 a 5,0	5,1 a 8,0	8,1 a 12,0	12,1 a 18,0	> 18,0
> 60	0 a 3,0	3,1 a 4,0	4,1 a 6,0	6,1 a 9,0	> 9,0
P rem	Teor de P no solo, extrator Mehlich 1 – sistemas de sequeiro				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Adequado	Alto
	-----mg/dm ³ -----				
≤ 10	0 a 2,0	2,1 a 3,0	3,1 a 4,0	4,1 a 6,0	> 6,0
11 a 30	0 a 3,0	3,1 a 5,0	5,1 a 8,0	8,1 a 12,0	> 12,0
31 a 45	0 a 5,0	5,1 a 10,0	10,1 a 15,0	15,1 a 20,0	> 20,0
46 a 60	0 a 6,0	6,1 a 12,0	12,1 a 18,0	18,1 a 25,0	> 25,0
P rem	Teor de P no solo, extrator Mehlich 1 – sistemas irrigados				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Adequado	Alto
	-----mg/dm ³ -----				
≤ 10	0 a 3,0	3,1 a 4,0	4,1 a 6,0	6,1 a 9,0	> 9,0
11 a 30	0 a 5,0	5,1 a 8,0	8,1 a 12,0	12,1 a 18,0	> 18,0
31 a 45	0 a 10,0	10,1 a 15,0	15,1 a 20,0	20,1 a 35,0	> 35,0
46 a 60	0 a 12,0	12,1 a 18,0	18,1 a 25,0	25,1 a 40,0	> 40,0
Sistema agrícola	Teor de P no solo extraído pela resina trocadora de íons				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Adequado	Alto
	-----mg/dm ³ -----				
Sequeiro	0 a 5	6 a 8	9 a 14	15 a 20	> 20
Irigado	0 a 8	9 a 14	15 a 20	21 a 35	> 35

¹ P remanescente (determinado nas análises de rotina nos laboratórios ligados ao PROFERT - MG).

² Método de determinação do P nas análises de rotina dos laboratórios ligados ao sistema IAC (Instituto Agrônomo de Campinas).

Tabela 6A. Fatores multiplicativos de transformação dos resultados de análise de solos, quando expressos em g/100g (%), g/kg, mg/dm³, kg/ha e t/ha.

Fonte: Adaptado de Verdade, 1963.

Expressões a transformar	g/100g (%)	g/kg	mg/dm ³ (*)	kg/ha (**)	t/ha (**)
G/100g (%)	1	10	10.000	20.000	20
g/kg	0,1	1	1.000	2.000	2
mg/dm ³ (*)	0,0001	0,001	1	2	0,002
kg/ha (**)	0,00005	0,0005	0,5	1	0,001
t/ha (**)	0,05	0,5	500	1.000	1

(*) Considerando-se densidade aparente de 1,0 kg/dm³ tem-se que 1 mg/dm³ = 1 ppm.

(**) Considerando-se 1 ha de 2.000 t (20 cm de profundidade e densidade do solo: 1,0 kg/dm³).

Tabela 7A. Fatores de conversão entre as unidades de representação dos macronutrientes. Com exceção de cmol_c, estes fatores podem ser usados em outras unidades de peso. Fonte: Adaptado de Verdade, 1963.

Elemento	Unidade conhecida	Centimol de carga	Forma elementar	Forma de óxido	Forma de radical	Forma de sal
N		cmol _c	g N	g NO ₃ ⁻ (*)	g NH ₄ ⁺	---
	cmol _c	1	0,1401	0,6201	0,1804	---
	g N	7,1377	1	4,42680	1,28783	---
	g NO ₃ ⁻	1,6126	0,22589	1	0,29092	---
	g NH ₄ ⁺	5,5432	0,77650	3,43740	1	---
P		cmol _c	g P	g P ₂ O ₅	g PO ₄ ³⁻	---
	cmol _c	1	0,1032	0,2367	0,3166	---
	g P	9,6899	1	2,29136	3,06618	---
	g P ₂ O ₅	4,2265	0,43642	1	1,33812	---
	g PO ₄ ³⁻	3,1589	0,32614	0,74732	1	---
K		cmol _c	g K	g K ₂ O	---	---
	cmol _c	1	0,3909	0,4709	---	---
	g K	2,5582	1	1,20458	---	---
	g K ₂ O	2,1236	0,83016	1	---	---
Ca		cmol _c	g Ca	g CaO	---	g CaCO ₃
	cmol _c	1	0,2004	0,2804	---	---
	g Ca	4,9900	1	1,39920	---	2,49726
	g CaO	3,5663	0,71470	1	---	1,78477
	g CaCO ₃	1,9984	0,40044	0,56023	---	1
Mg		cmol _c	g Mg	g MgO	---	g MgCO ₃
	cmol _c	1	0,1215	0,2015	---	0,4216
	g Mg	8,2304	1	1,65807	---	3,46829
	g MgO	4,9628	0,60311	1	---	2,09100
	g MgCO ₃	2,3719	0,28833	0,47807	---	---
S		cmol _c	g S	---	g SO ₄ ²⁻	g CaSO ₄
	cmol _c	1	0,1603	---	0,4803	0,6807
	g S	6,2375	1	---	2,99588	4,24588
	g SO ₄ ²⁻	2,0820	0,33379	---	1	1,41724
	g CaSO ₄	1,4691	0,23552	---	0,70560	2

(*) Não é óxido, mas sim, radical.