

MANUAL DE NUTRIÇÃO DE PLANTAS FORRAGEIRAS



Renato de Mello Prado

Capítulo 1 Introdução ao curso	
1.1 Conceitos em nutrição de plantas e sua relação com as disciplinas afins	
1.2 Conceito de nutrientes e critérios de essencialidade	
1.3 Composição relativa de nutrientes nas plantas	
1.4 Acúmulo de nutrientes pelas culturas e a formação de colheita	
1.5 Elementos químicos benéficos e tóxicos às plantas	
1.6 Princípios para o cultivo de plantas em solução nutritiva (pesquisa)	
Capítulo 2 Relação da nutrição de forrageiras e o desempenho animal	
2.1 Introdução	
2.2 Aspectos nutricionais das forrageiras cultivadas no Brasil	
2.3 Importância da eficiência agrônômica para produção de forrageiras e da eficiência de pastejo	
2.4 Importância da nutrição na qualidade de forrageiras e produção animal.....	
Capítulo 3 Macronutrientes: absorção, transporte, redistribuição, funções e sintomatologia ..	
3.1 Nitrogênio	
3.2 Enxofre	
3.3 Fósforo	
3.4 Potássio	
3.5 Cálcio	
3.6 Magnésio	
Capítulo 4 Micronutrientes: absorção, transporte, redistribuição, funções e sintomatologia ...	
4.1 Boro	
4.2 Zinco	
4.3 Manganês	
4.4 Ferro	
4.5 Cobre	
4.6 Molibdênio	
4.7 Cloro	
Capítulo 5 Princípios da diagnose visual e foliar	
5.1 Introdução	
5.2 Critérios de amostragem de folhas	
5.3 Preparo de material vegetal e análises químicas	
5.4 Considerações gerais sobre diagnose foliar	
Capítulo 6 Nutrição de plantas forrageiras gramíneas	
6.1 Gramíneas para pasto exclusivo	
6.1.2 Gramíneas do grupo I	
6.1.2.1 Aspectos da nutrição na produção das forrageiras	
6.1.2.2 Teor foliar adequado para os macronutrientes	
6.1.2.3 Teor foliar adequado para os micronutrientes	
6.1.3 Gramíneas do grupos II	
6.1.3.1 Aspectos da nutrição na produção das forrageiras	
6.1.3.2 Teor foliar adequado para os macronutrientes	
6.1.3.3 Teor foliar adequado para os micronutrientes	

6.1.4 Gramíneas do grupo III	
6.1.4.1 Aspectos da nutrição na produção das forrageiras.....	
6.1.4.2 Teor foliar adequado para os macronutrientes	
6.1.4.3 Teor foliar adequado para os micronutrientes	
6.2 Gramíneas para fenação	
6.2.1 Aspectos da nutrição na produção das forrageiras	
Capítulo 7 Nutrição de plantas forrageiras leguminosas	
7.1 Leguminosas exclusivas do grupo I	
7.1.2 Aspectos da nutrição na produção das forrageiras.....	
7.1.2 Teor foliar adequado para os macronutrientes	
7.1.3 Teor foliar adequado para os micronutrientes	
7.2 Leguminosas exclusivas do grupo II	
7.2.1 Aspectos da nutrição na produção das forrageiras	
7.2.2 Teor foliar adequado para os macronutrientes	
7.2.3 Teor foliar adequado para os micronutrientes	
7.3 Leguminosas para exploração intensiva	
7.3.1 Aspectos da nutrição na produção das forrageiras	
7.3.2 Teor foliar adequado para os macronutrientes	
7.3.3 Teor foliar adequado para os micronutrientes	
Capítulo 8 Nutrição de plantas forrageiras capineiras	
8.1 Aspectos da nutrição na produção das forrageiras	
8.2 Teor foliar adequado para os macronutrientes	
8.3 Teor foliar adequado para os micronutrientes	
Capítulo 9 Nutrição de plantas forrageiras para pasto consorciado	
9.1 Consórcio de gramíneas e leguminosas do grupo I	
9.1.1 Aspectos da nutrição na produção das forrageiras.....	
9.1.2 Teor foliar adequado para os macronutrientes e os micronutrientes	
9.2 Consórcio gramíneas e leguminosas do grupo II	
9.2.1 Aspectos da nutrição na produção das forrageiras.....	
9.2.2 Teor foliar adequado para os macronutrientes e os micronutrientes	
9.3 Consórcio de culturas anuais e forrageiras	
9.3.1 Aspectos da nutrição na produção das forrageiras.....	
9.3.2 Teor foliar adequado para os macronutrientes e os micronutrientes	
Capítulo 10 Nutrição de plantas anuais: milho, sorgo, soja, girassol, aveia-preta e milheto	
10.1 Aspectos da nutrição na produção das forrageiras.....	
10.2 Teor foliar adequado para os macronutrientes	
10.3 Teor foliar adequado para os micronutrientes	
Capítulo 11 Prática experimental: diagnose de deficiência nutricional em plantas forrageiras	

Referências

Capítulo 1 INTRODUÇÃO À NUTRIÇÃO DE PLANTAS

1.1 Conceitos em nutrição de plantas e a sua relação com as disciplinas afins

No século XIX, o Químico Just Von **Liebig** (1803-1873), “pai da nutrição mineral de plantas”, estabelecia, na Alemanha, que os alimentos de todas as plantas verdes são as substâncias inorgânicas ou minerais. Este trabalho foi apresentado no evento da Associação Britânica para o Progresso da Ciência e resultou, em 1840, na publicação do livro “*Química orgânica e suas aplicações na agricultura e fisiologia*”. Liebig, com seu vigor dominante, conseguiu convencer a comunidade científica da época com sua teoria, embora seja uma compilação de trabalhos de outros autores (Saussure, Sprengel, etc.) (Browne et al., 1942).

Portanto, segundo Epstein (1975), a principal contribuição de Liebig à nutrição de plantas foi a de ter liquidado com a “teoria do húmus”, de que a matéria orgânica do solo era a fonte do carbono absorvido pelas plantas. Dessa forma, segundo a teoria de Liebig, a planta vive de ácido carbônico, amoníaco (ácido azótico), água, ácido fosfórico, ácido sulfúrico, ácido silícico, cal magnésia, potassa (soda) e ferro. Assim, durante todo o final do século XIX, a lista clássica dos nutrientes de plantas eram basicamente o N, P, S, K, Ca, Mg e Fe. Definindo-se, assim, a exigência das plantas essencialmente dos macronutrientes. E ainda, nesta época, Liebig contribuiu para o surgimento das indústrias de adubos. No século XX, é que se definiu o conceito de micronutrientes, ou seja, aqueles igualmente essenciais, porém exigidos em menores quantidades pelas plantas. No Brasil, nesta época, foram criadas as primeiras instituições de ensino e pesquisa (UFBA em 1877; IAC em 1887, e ESALQ em 1901), estabelecendo a base dos estudos em nutrição de plantas, com início na década de 50.

Assim, estudo de nutrição de plantas estabelece **quais são os elementos essenciais para o ciclo de vida da planta, como são absorvidos, translocados e acumulados, suas funções, exigências e os distúrbios que causam quando em quantidades deficientes ou excessivas.**

Desse modo, percebe-se que a nutrição de plantas apresenta os aspectos ligados desde a aquisição do nutriente pelas raízes, ligados à Ciência do Solo, até as funções que desempenha nas plantas, relacionadas aos aspectos estudados na Bioquímica e na Fisiologia Vegetal. E assim, de forma mais ampla tem-se uma relação estreita entre a nutrição de plantas e a agronomia. Pois é conhecido que os objetivos principais da ciência agrônômica estão voltados para a produção de alimentos, fibras e energia. Para isso, existem mais de cinquenta fatores de produção que devem ser considerados para atingir a máxima eficiência dos sistemas de produção agrícolas. Esses fatores de produção estão distribuídos em três grandes sistemas como: solo, planta e ambiente. A área de nutrição de plantas está centrada no sistema planta, assim como outras (fitopatologia, fisiologia vegetal, biologia molecular, melhoramento vegetal, fitotecnia, etc.). No solo, estão as áreas de fertilidade do solo, fertilizantes/corretivos, adubação, entre outras, e no ambiente irrigação e drenagem, a climatologia, etc. Ressalta-se que a maioria desses fatores de produção pode ser controlada, no campo, pelo produtor; entretanto, alguns são de difícil controle, como a luz e a temperatura.

Especificamente a nutrição de plantas tem relação estreita com a agronomia especialmente com as disciplinas de fertilidade do solo, fertilizantes/corretivos e a adubação das culturas. Adubação = $(QP - QS) \div$ fator f; QP = Quantidade de nutriente requerida pela planta (exigência nutricional); QS=Quantidade de nutriente contido no solo; f= fator de eficiência de fertilizantes, que pode ser reduzido pelas perdas (volatilização; adsorção; lixiviação, erosão, etc.) no solo. Admite-se fator de eficiência de 50; 30 e 70% para N, P e K, respectivamente, correspondendo ao valor de f igual a: 0,50; 0,30; 0,70, respectivamente. Assim, observa-se que são utilizados na adubação 2 vezes mais N, 3,3 vezes mais P e 1,4 vez mais K para garantir a adequada nutrição das plantas.

Neste sentido, avaliando-se os trabalhos publicados em revistas agronômicas brasileiras sobre a Ciência do Solo (Revista Brasileira de Ciência do Solo, Scientia Agricola, Bragantia e Pesquisa Agropecuária Brasileira), nos últimos 20 anos (1987 a 2007), a partir de 3245 artigos, verificou-se que os trabalhos estiveram concentrados em quatro áreas como a fertilidade do solo (25,7%), nutrição de plantas (23,1%), biologia do solo (10,8%) e manejo e conservação do solo (10,6%) (Prado, dados não publicados). Dessa forma, observa-se que, apesar de as revistas terem abordado diversos assuntos, a fertilidade do solo e a nutrição de plantas, representa quase a metade dos artigos publicados em Ciência do Solo, sendo estas, de natureza profissionalizante. A preferência por determinadas áreas e por determinados assuntos é visível, o que demonstra a importância da nutrição de plantas.

Existem outras áreas correlatas à Nutrição de Plantas, fora da Ciência do Solo, como Fitopatologia, Melhoramento Vegetal e até a Mecanização, entre outras.

1.2 Conceito de nutriente e critérios de essencialidade

Na natureza, existem muitos elementos químicos sem considerar os isótopos, conforme a tabela periódica, com mais de uma centena de elementos químicos, sujeita a aumento com novas descobertas pela ciência, que pode ocorrer inclusive por síntese em laboratório.

Entretanto, quando se realiza a análise química do tecido vegetal, é comum encontrar cerca de meia centena de elementos químicos; entretanto, nem todos são considerados nutrientes da planta. Isso ocorre porque as plantas têm habilidade de absorver do solo, ou da solução nutritiva, os elementos químicos disponíveis sem grandes restrições, podendo ser um nutriente ou um elemento benéfico e/ou tóxico. Salienta-se que as considerações a respeito do elemento benéfico e/ou tóxico serão abordadas no próximo item.

Quanto ao nutriente, ele é definido como um elemento químico essencial às plantas, ou seja, sem ele a planta não vive. Para que um elemento químico seja considerado nutriente, é preciso atender aos dois critérios de essencialidade, o direto e o indireto, ou ambos, que foram propostos por Arnon & Stout (1939), fisiologistas da Universidade da Califórnia, graças ao avanço da ciência referente à química analítica que permitiu a determinação dos elementos químicos, traços, e também pelo avanço das técnicas de cultivo em solução nutritiva. Os critérios de essencialidade estão descritos abaixo:

Direto

a) O elemento participa de algum composto ou de alguma reação, sem a qual a planta não vive.

Indireto

a) O elemento não pode ser substituído por nenhum outro.

b) O elemento deve ter um efeito direto na vida da planta e não exercer apenas o papel de, com sua presença no meio, neutralizar efeitos físicos, químicos ou biológicos desfavoráveis ao vegetal.

Recentemente, Epstein & Bloom (2006) propuseram uma adequação aos critérios de essencialidade, ou seja, um elemento é essencial se preencher um ou ambos os critérios:

a) O elemento é parte de uma molécula que é um componente intrínseco da estrutura ou do metabolismo da planta.

b) A planta pode ser tão severamente privada do elemento que exibe anormalidades em seu crescimento, desenvolvimento ou reprodução – isto é, em sua “performance” – em comparação com plantas menos privadas.

A literatura mundial considera dezesseis elementos químicos como nutrientes de plantas, a saber: C, H, O, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Zn, Cu, B, Cl e Mo. Os nutrientes são importantes para a vida, porque desempenham funções importantes em seu metabolismo, seja como substrato (composto orgânico), seja como sistemas enzimáticos. De forma sucinta, tais funções podem ser classificadas como (Malavolta et al., 1997):

- Estrutural (faz parte da estrutura de qualquer composto orgânico vital para a planta);
- Constituinte de enzima (faz parte de uma estrutura específica, grupo prostético/ativo de enzimas);
- Ativador enzimático (não faz parte da estrutura). Salienta-se que o nutriente, não só ativa, como também inibe sistemas enzimáticos, afetando a velocidade de muitas reações no metabolismo do vegetal.

Epstein & Bloom (2006) propuseram outra classificação dos nutrientes, mais detalhada, organizados pelas funções que desempenham nas plantas:

- Nutrientes que são elementos integrais de compostos orgânicos. Ex. N, S;
- Nutriente para a aquisição e utilização de energia e para o genoma. Ex. P.;
- Nutrientes estruturalmente associados com a parede celular. Ex. Ca, B (Si);
- Nutrientes que são constituídos integralmente de enzimas e outras entidades essenciais do metabolismo. Ex. Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Mo, (Ni).
- Nutrientes que servem para ativar ou controlar a atividade de enzimas. Ex. K, Cl, Mg, Ca, Mn, Fe, Zn, Cu (Na);
- Funções não-específicas: nutrientes que servem como contra-íons, para cargas positivas ou negativas. Ex. K^+ , NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{+2} , Mg^{+2} , (Na^+) ;
- Funções não-específicas: nutrientes que servem como agente osmótico celular. Ex. K^+ , NO_3^- , Cl^- , (Na^+) .

Nos próximos capítulos, serão discutidas o papel de cada nutriente, após terem atingido seus destinos, ou seja, os locais onde as várias funções são exercidas, na unidade funcional básica da planta, a célula (as paredes celulares, o citoplasma e o vacúolo).

Quando um dado nutriente desempenha sua função na planta ou seja a integração das funções bioquímicas, são afetadas um ou diversos processos fisiológicos importantes (fotossíntese, respiração, etc.) que têm influência no crescimento e na produção das culturas.

A fotossíntese é uma reação físico-química mais importante do planeta, uma vez que todas as formas de vida dependem dela. Ocorre a síntese de compostos orgânicos a partir da luz (visível 400 a 740 nm), feita por pigmentos fotossintéticos (clorofilas, carotenóides e ficobilinas) presente nas plantas. Entretanto, uma pequena fração da radiação solar (~5%) que atinge a Terra é convertida pela fotossíntese foliar em compostos orgânicos.

Em síntese, a reação físico-química da fotossíntese ocorre em dois passos. Durante a **fase fotoquímica ou luminosa**, a luz do sol é utilizada para desdobrar a molécula de água (H_2O) em oxigênio (O_2), (conversão da energia luminosa em energia elétrica), que, por sua vez, gera a energia química, tendo como produtos primários ATP e o NADPH. Assim, a captura da energia luminosa é usada para permitir a transferência de elétrons por uma série de compostos que agem como doadores de elétron e receptores de elétron. A fotólise da molécula de água e o transporte de elétrons permitem a criação de um gradiente de prótons entre o lúmen do tilacóide e o estroma do cloroplasto. A maioria de elétrons no final das contas reduz $NADP^+$ em NADPH. A energia luminosa também é usada para gerar uma força motiva de próton através da membrana do tilacóide que é usada para sintetizar ATP via complexo ATP-sintase. Na **fase não luminosa ou** ciclo fotossintético redutivo do carbono, é uma etapa basicamente enzimática, na qual a luz não é necessária, os produtos primários da etapa anterior são utilizados para, a partir do dióxido de carbono (CO_2), obter hidratos de carbono ($C_n(H_2O)_n$), como a glicose. A energia livre para a redução de um mol de CO_2 até o nível de glicose é de 478 kJ mol^{-1} .

Salienta-se que o processo fotossintético ocorre dentro dos cloroplastos, que são plastídeos localizados em células do mesófilo paliçádico e do lacunoso. O número de cloroplastos por célula varia de um a mais de cem, dependendo do tipo de planta e das condições de crescimento. Os cloroplastos têm forma discóide, com diâmetro de 5 a 10 micras, limitado por uma dupla membrana (externa e interna). A membrana interna atua como uma barreira, controlando o fluxo de moléculas orgânicas e íons dentro e fora do cloroplasto. Moléculas pequenas, como CO_2 , O_2 e H_2O , passam livremente através das membranas do cloroplasto. Internamente, o cloroplasto é composto de um sistema complexo de membranas *tilacoidais*, que contêm a maioria das proteínas necessárias para a etapa fotoquímica da fotossíntese. As proteínas requeridas para a fixação e redução do CO_2 estão localizadas na matriz incolor, denominada *estroma*. As membranas tilacoidais formam os *tilacóides*, que são vesículas achatadas com um espaço interno aquoso, chamado *lúmen*. Os tilacóides, em certas regiões, dispõem-se em pilhas, chamadas de *granum* (Figura 1). Assim, a primeira etapa da fotossíntese ocorre nas membranas internas dos cloroplastos, os tilacóides, enquanto a segunda etapa ocorre no estroma dos cloroplastos, a região aquosa que cerca os tilacóides. Desse modo, os produtos formados na fotossíntese, fontes de carbono, são acumulados como a sacarose nos vacúolos e o amido nos cloroplastos, para depois serem utilizados na própria fotossíntese, como na respiração, síntese de reservas e de materiais estruturais.

Pode-se adiantar que o processo fotossintético em si depende também de alguns nutrientes que atuam com função estrutural ou enzimática e, ainda, os produtos formados pela fotossíntese, que também dependerão dos nutrientes para produzir outros compostos orgânicos vitais para o desenvolvimento e a produção das plantas, que serão detalhados nos próximos capítulos.

Assim, percebe-se a importância dos nutrientes na vida das plantas. De acordo com a história da nutrição das plantas, os elementos químicos, atualmente considerados nutrientes de plantas, foram descobertos e demonstrada a sua essencialidade a partir do ano de 1804 (C, H, O, N), e depois em 1860-1865 (P, S, K, Ca, Mg e Fe), 1922 a 1939 (Mn, Cu, Zn, B e Mo) até recentemente, em 1954 (Cl) (Class, 1989).

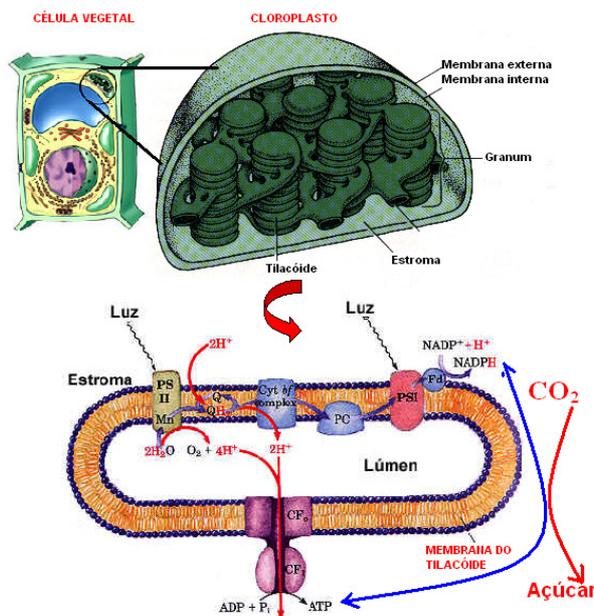


Figura 1. Esquema de uma célula vegetal, do cloroplasto e alguns detalhes do processo fotossintético.

É pertinente salientar que, na literatura, existem divergências sobre o autor que demonstrou a essencialidade de um dado nutriente, muitas vezes, devido aos problemas no rigor científico da pesquisa. Um exemplo deste fato é o boro, cuja a essencialidade é creditado para o pesquisador Warington (1923).

Embora esses nutrientes sejam igualmente importantes para a produção vegetal, existe uma classificação baseada na proporção em que aparecem na matéria seca dos vegetais. Portanto, existem dois grandes grupos de nutrientes de plantas (não considerando C, H e O):

Macronutrientes – São os nutrientes que são absorvidos ou exigidos pelas plantas em maiores quantidades: **N, P, K, Ca, Mg e S** (expresso em g kg^{-1} de matéria seca). Os macronutrientes podem ainda ser divididos em macronutrientes primários, que são N, P e K, e os macronutrientes secundários, que são o Ca, Mg e S.

Micronutrientes – São os nutrientes que são absorvidos ou exigidos pelas plantas em menores quantidades: **Fe, Mn, Zn, Cu, B, Cl e Mo** (expresso em mg kg^{-1} de matéria seca).

Em alguns casos, culturas acumuladoras de determinados micronutrientes podem apresentar teor maior que um macronutriente. Assim, sugeriram outros sistemas de classificação dos nutrientes, baseada não na quantidade acumulada pela planta, e sim agrupadas em função do papel (bioquímico) que desempenha na

vida da planta. Desse modo, Mengel & Kirkby (1987) classificaram os nutrientes em quatro grupos. O primeiro grupo é formado pelo C, H, O, N e S, considerados nutrientes estruturais constituintes da matéria orgânica e também com participação em sistemas enzimáticos, assimilação em reações de oxirredução. O segundo grupo é composto pelo P e o B, e em algumas culturas o Si, sendo nutrientes que formam com facilidade ligações do tipo éster (transferidores de energia). O terceiro grupo é formado pelo K, Mg, Ca, Mn, Cl, (Na), considerados nutrientes responsáveis pela atividade enzimática e também atuam na manutenção do potencial osmótico, no balanço de íons e no potencial elétrico, especialmente o K e Mg. E no último grupo, têm-se o Fe, Cu, Zn e Mo, que atuam como grupos prostéticos de sistemas enzimáticos e também participam no transporte de elétrons (Fe e Cu) para diversos sistemas bioquímicos.

Cabe salientar que a lista dos dezesseis elementos químicos, considerados essenciais, pode aumentar com o avanço da pesquisa. Embora exista estudos isolados, alguns autores indicam certos elementos como essenciais às plantas, como Ni em soja (Eskewet et al.,1984; Brown et al., 1987; Epstein & Bloom, 2006; Dechen & Nachtigall,2006), Na em alfafa (Loué, 1993), Se (Wen, 1988) e Si em tomateiro (Miyake & Takahashi,1978). Diante disso, publicação recente incluiu como nutriente o Ni, o Se e o Co (Malavolta, 2006). É satisfatório reconhecer que para um elemento ser incluído nesta lista, é mais provável que seja um micronutriente; entretanto, espera-se que estudos adicionais sejam realizadas, a fim de atender aos critérios de essencialidade, em número considerável de espécies de plantas, para que a comunidade científica internacional seja convencida. Nesse sentido, existem “fortes candidatos” para a ampliação da lista de nutrientes, como o Si e o Na (Malavolta et al.,1997).

1.3 Composição relativa de nutrientes nas plantas

Em uma planta colhida fresca, dependendo da espécie, pode-se observar que a maior proporção de sua massa, de 70 até 95%, é constituída por água (H₂O). Após a secagem desta planta em estufa (circulação forçada de ar, a ±70°C por 24-48 horas), evapora-se a água e obtém-se a matéria seca ou a massa seca e, quando submetida à mineralização, seja em forno mufla (300°C), seja em ácido forte, separam-se os componentes orgânico e o mineral (nutrientes). Realizando-se análise desse material vegetal seco, observa-se, de maneira geral, o predomínio de C, H e O, compondo 92% da matéria seca das plantas (Tabela 1).

Salienta-se que os resultados da análise química do material vegetal são expressos com base na matéria seca, pois essa é mais estável que a fresca, que varia de acordo com o meio, ou seja, com a hora do dia, com a água disponível no solo, com a temperatura, entre outros.

Ressalta-se que o C provém do ar atmosférico na forma de gás carbono, CO₂; o H e O vêm da água, H₂O; enquanto os minerais (macro e micronutrientes) vêm do solo, direta ou indiretamente; portanto, percebe-se que o nutriente das plantas provém de três sistemas: ar, água e solo. Assim, cerca de 92% da matéria seca das plantas provêm dos sistemas ar e água e apenas 8% provêm do solo; entretanto, embora este último seja menos importante, quantitativamente, em relação aos demais, é o mais discutido nos estudos de

nutrição de plantas e, também, o mais dispendioso aos sistemas de produção agrícola, especialmente se considerarmos que o ar e a água da chuva têm “custo zero” (em sistema de produção não-irrigado).

Tabela 1. Composição relativa dos nutrientes presente na matéria seca das plantas

Classificação	Nutriente (forma elementar) ¹	Participação %	Total
Macronutrientes orgânicos	C	42	92
	O	44	
	H	6	
Macronutrientes	N	2,0	7
	P	0,4	
	K	2,5	
	Ca	1,3	
	Mg	0,4	
	S	0,4	
Micronutrientes	Cl, Fe, Mn, Zn, B, Cu, Mo		1
Total geral			100

¹ Nem sempre a forma elementar dos nutrientes é a forma química que as plantas absorvem.

1.4 Acúmulo de nutrientes pelas culturas e a formação de colheita

De forma geral, as culturas apresentam suas necessidades nutricionais, que representam as quantidades de macro e micronutrientes que as plantas retiram do solo, ao longo do cultivo, para atender a todas as fases de desenvolvimento, expressando em colheitas adequadas (máximas econômicas).

Observa-se, assim, que as culturas em geral, e também a cana-de-açúcar, a soja e a braquiária, apresentam, como regra, alta exigência em nitrogênio e/ou potássio e em cobre e molibdênio (Tabela 2); entretanto, a ordem de exigências para os demais nutrientes pode apresentar variações entre as culturas e até entre cultivar/híbrido.

A ordem-padrão, decrescente de extração das culturas em geral, é a seguinte:

Macronutrientes: N > K > Ca > Mg > P ↔ S

Micronutrientes: Cl > Fe > Mn > Zn > B > Cu > Mo

Mas, considerando as culturas apresentadas na Tabela 2, nota-se que houve alteração para essa ordem de extração total de nutrientes. Nos macronutrientes, observa-se, em cana-de-açúcar, em capim-braquiária e capim-pé-de-galinha, maior exigência para o K em relação ao N. Para os micronutrientes, nota-se que o Cl é o mais extraído (não citado); entretanto, o mesmo, na alteração da ordem-padrão, ocorre especialmente entre o Zn e o B, sendo, por exemplo, a cana-de-açúcar mais exigente em Zn, e a soja em B. Nota-se que a extração de micronutrientes (exceto o Cl e o Fe) pelos capins é inferior a 1 kg ha⁻¹ (Tabela 2), implicando que as doses indicadas para atender à exigência nutricional é igual ou inferior a 2 kg ha⁻¹ (Mo=0,2; Zn e Cu= 2; B=1 kg ha⁻¹) (Vilela et al., 2007). As forrageiras com alta produção de biomassa,

como colonião (23 t ha⁻¹), apresentam alta extração de nutrientes: K=363; N=288; Ca=149; Mg=99 e P=44 kg ha⁻¹ (Sanchez, citado por Macedo, 2004).

Com relação à **exportação** dos nutrientes levados da área agrícola, tem-se significativa quantidade de elementos mobilizados no produto da colheita (colmo ou grão) (Tabela 2). Nota-se que parte significativa do N, S, P, Zn entre outros são mobilizados nos grãos. Desse modo, os nutrientes são estocados nas sementes na forma de compostos orgânicos específicos, a exemplo do N e do S, que se acumulam em proteínas específicas de armazenamento (Müntz, 1998), o P e vários cátions estão na forma de fitatos (Raboy, 2001). E cada molécula de fitato contém seis grupos de fosfatos que formam complexos com cátions e, então, a maioria do K, Mg, Mn, Ca, Fe e Zn em sementes é associada ao fitato (Epstein & Bloom, 2006). Conseqüentemente, para os seres vivos (humanos e animais), sementes são mais nutritivas que o resto da planta. Assim, teores de nutrientes mais elevados nas sementes terão benefícios na qualidade do alimento. E ainda, em campos de produção de sementes, essa qualidade terá reflexos no crescimento inicial de nova cultura. Muitas plantas podem viver do P contido na semente por cerca de duas semanas (Grant et al., 2001).

Tabela 2. Extração total (parte aérea) e exportação pela colheita (colmos/grãos/forragem) de algumas culturas

Nutriente	— Cana-de-açúcar — 100 t ha ⁻¹			— Soja — 5,6 t ha ⁻¹			— Forrageiras — 13,5 t ha ⁻¹ 6,4 t ha ⁻¹		
	Colmos	Folhas	Total	Grãos	Restos culturais	Total	Capim-braquiária ¹	Capim-moa ²	Capim-pé-de-galinha ³
	kg ha⁻¹								
N	90	60	150	152	29	181	59,4	130	116,7
P	10	10	20	11	2	13	14,6	28	12,6
K	65	90	155	43	34	77	145,9	91	131,9
Ca	60	40	100	8	43	51	14,0	37	47,5
Mg	35	17	52	6	20	26	14,5	35	18,6
S	25	20	45	4	2	6	-	6	16,4
	g ha⁻¹								
B	200	100	300	58	131	189	-	-	-
Cu	180	90	270	34	30	64	21,6	53,5	106,8
Fe	2500	6400	8900	275	840	1115	4430	5653,0	633,2
Mn	1200	4500	5700	102	210	312	918	718,0	596,3
Mo	-	-	-	11	2	13	-	-	-
Zn	500	220	720	102	43	145	194,5	490,2	231,7

¹ *B.brizantha*, cultivada em solo sob o manejo pelo sistema "barreirão" (Magalhães et al., 2002); ² *Setaria incana* referente à parte aérea com grãos, aos 69 dias após semeadura (Nakazu et al., 2006); ³ *Eleusine coracana* L. Gaertn., referente à parte aérea, na época do florescimento (Francisco, 2002).

Normalmente, a exigência nutricional de uma determinada forrageira poderá ser afetada pelo sistema de produção adotado, ou seja, produção de forragem ou de grãos/sementes. Nesse sentido, os requerimentos de fertilidade do solo para produção de sementes de determinada cultivar são superiores àqueles necessários para essa mesma cultivar quando utilizada como pastagem (Souza, 2001).

Por outro lado, na prática, as culturas que exportam com a colheita grande parte dos nutrientes absorvidos, ou aquelas cujo o produto colhido é toda a parte aérea (cana-de-açúcar, milho, silagem,

pastagem) deixam muito pouco restos de cultura e, assim, merecem mais atenção em termos de necessidade de reposição desses nutrientes, por meios de adubação de manutenção.

Entretanto, os restos culturais deixados na superfície do solo podem ser reciclados e aproveitados pelas plantas, atingindo 60% a 70% para o N; 100% para o K (Spain & Salinas, 1985) e 77% para o P (Jones & Woodmanse, 1979). Diante da reciclagem, espera-se que os nutrientes satisfaçam parte da necessidade da forrageira e, portanto, a exigência nutricional da pastagem na fase de manutenção seria inferior à fase de estabelecimento. Além disso, a forrageira, na fase de implantação, apresentaria maior produção de biomassa (cerca de 30%), comparada aos demais ciclos de crescimento, pois a ausência de estresse fisiológico da planta, induzido pelo pastejo, elevaria a exigência nutricional no primeiro ciclo de crescimento.

Nesse sentido, os estudos sobre a extração de nutrientes podem identificar, nas culturas, a exigência nutricional para um determinado nutriente e, assim, é possível atender a sua demanda, incrementando a produção da cultura. O fornecimento de nutrientes para as plantas é importante, pois, além de participarem das moléculas orgânicas que constituem as plantas, além da sua síntese como catalisadores em reações, com menor gasto de energia, auxilia também na economia de água pelas plantas. No caso da forrageira, com e sem adubação, são requeridos 1.600 L e 600 L de água, respectivamente, para cada kg de massa seca produzida (Bonamigo, 1999).

Ainda em relação à exigência nutricional, é satisfatório admitir que a extração dos nutrientes do solo não ocorre de forma constante ao longo do ciclo de produção da cultura. Na prática, a curva de extração de nutriente ao longo do tempo de cultivo (marcha de absorção) segue a do crescimento da planta, explicado por uma “curva sigmóide”. É caracterizada por uma fase inicial de baixo crescimento e absorção de nutrientes e, na fase seguinte, têm-se crescimento rápido (quase linear) da planta com elevada taxa de absorção/acúmulo de nutrientes e, depois, uma estabilização no crescimento/desenvolvimento e também na absorção de nutrientes da planta, até completar o ciclo de produção. Entretanto, no final desta última fase, o acúmulo de certos nutrientes (K, N) pode estabilizar ou até sofrer diminuição no acúmulo, devido às perdas de folhas senescentes e também à perda do nutriente da própria folha (lavagem de K). Esse padrão da marcha de absorção de nutrientes ocorre na maioria das forrageiras (Figuras 2 a,b) (Braz et al., 2004).

Na prática, os produtores aplicam parte do nutriente na sementeira e depois em cobertura, no início do crescimento rápido, e outra quando a forrageira atingir uma cobertura de 60-70% do solo, tendo maior aproveitamento do nutriente (Coelho & Martins, 2004). Para estabelecer o momento da aplicação dos nutrientes é importante conhecer o ciclo efetivo da forrageira, governado pela qualidade da mesma, por exemplo em capim-elefante. Dall'Agnol (2004) indica que o corte desse capim deve ocorrer aos 63 dias de crescimento, embora tenha atingido apenas 3,3 t ha⁻¹ de matéria seca, associado com alto teor de proteína (>10%); entretanto, aos 210 dias, há produção de 32 t ha⁻¹ de matéria seca. Portanto, a aplicação de nutriente, na presente forrageira, deve ocorrer nos primeiros 50 dias após o corte e não aos 200 dias após o corte. É pertinente salientar que, embora a maioria dos trabalhos da literatura tenha estabelecido a marcha de absorção utilizando dados cronológicos (em dias), o crescimento das plantas é influenciado pelo clima, a exemplo da radiação solar e da temperatura do ar, com efeitos distintos na ecofisiologia vegetal. A radiação é

a fonte da energia que é convertida em biomassa vegetal, e a temperatura está associada à eficiência dos processos metabólicos envolvidos nessa conversão, alterando o desempenho de várias enzimas (Bonhomme, 2000).

As forrageiras desenvolvem-se à medida que se acumulam unidades térmicas acima de uma temperatura-base, ao passo que, abaixo dessa temperatura, o crescimento cessa. Assim, através do acúmulo térmico, também conhecido como graus-dia, têm-se obtido ótimas correlações com a duração do ciclo da cultura, ou com os estádios do desenvolvimento fenológico de uma dada cultivar. Portanto, seria interessante que novos trabalhos que tratam de marcha de absorção, sejam desenvolvidos em função dos graus-dia acumulados durante o ciclo da cultura.

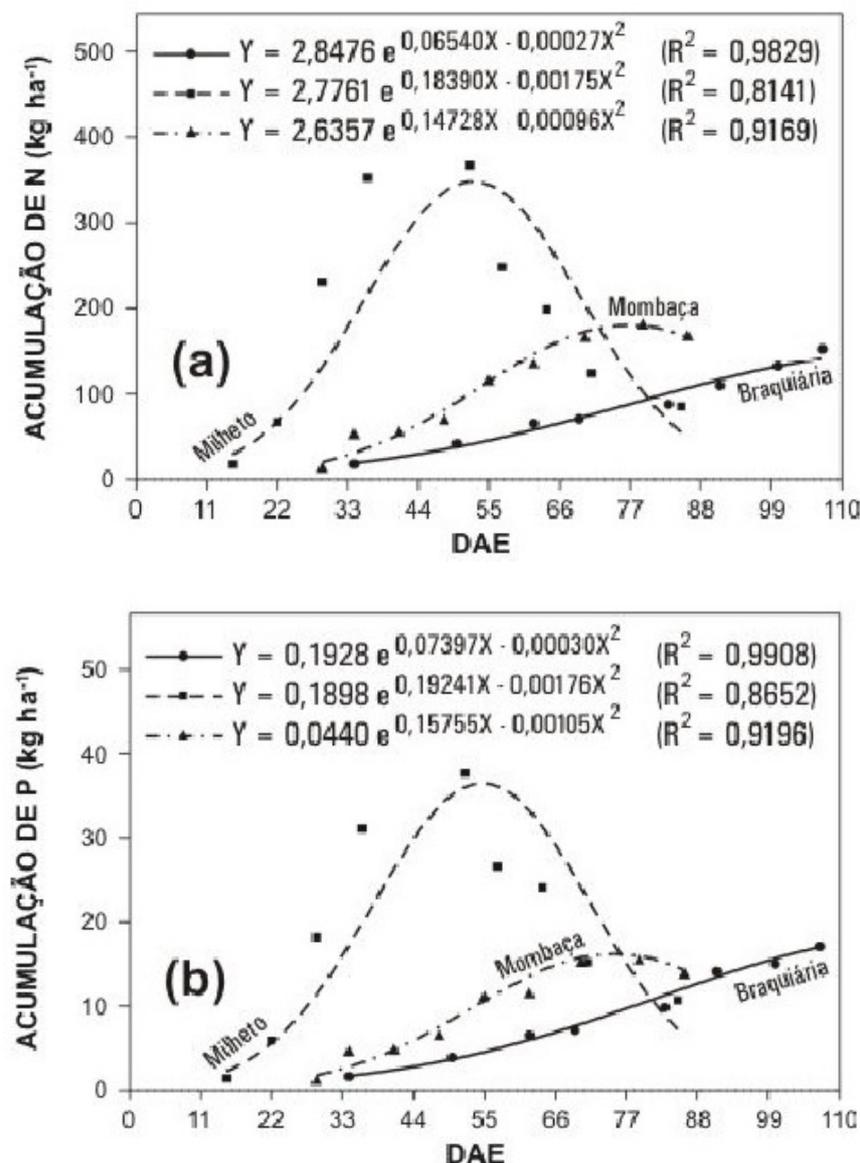
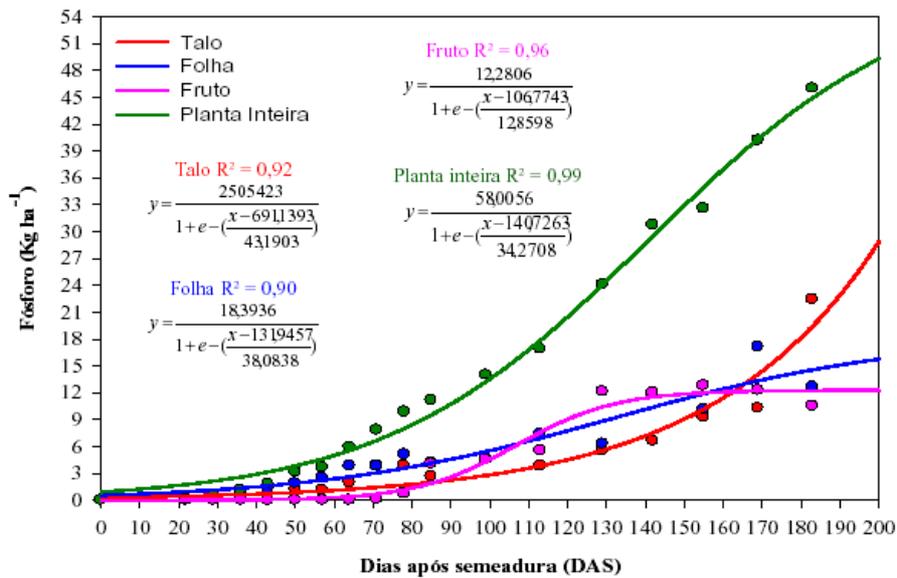
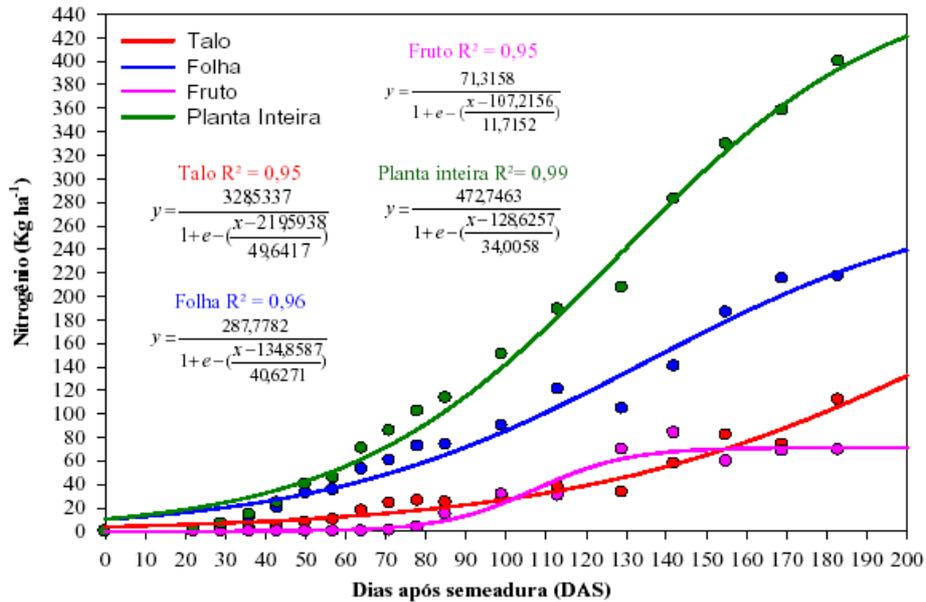


Figura 2. Acumulação de N (a), de P (b) no limbo foliar do milheto, braquiária e mombaça, em função de dias após a emergência da planta (DAE) (Braz et al., 2004).

Cerutti et al. (2007) estudaram o crescimento e a marcha de absorção dos nutrientes em feijão-deporco. A produção de fitomassa no período em que a forrageira cobria 100% do solo, aos 112 dias após a

semeadura, foi de 9.900 kg massa seca ha⁻¹; neste mesmo período, acumulava 295 kg N ha⁻¹, 25 kg P ha⁻¹ e 226 kg K ha⁻¹. Ao fim do ciclo, 183 dias após a semeadura, o feijão-de-porco acumulou 15,5 t massa seca ha⁻¹, 397 kg N ha⁻¹, 46 kg P ha⁻¹ e 340 kg K ha⁻¹ (Figura 3).



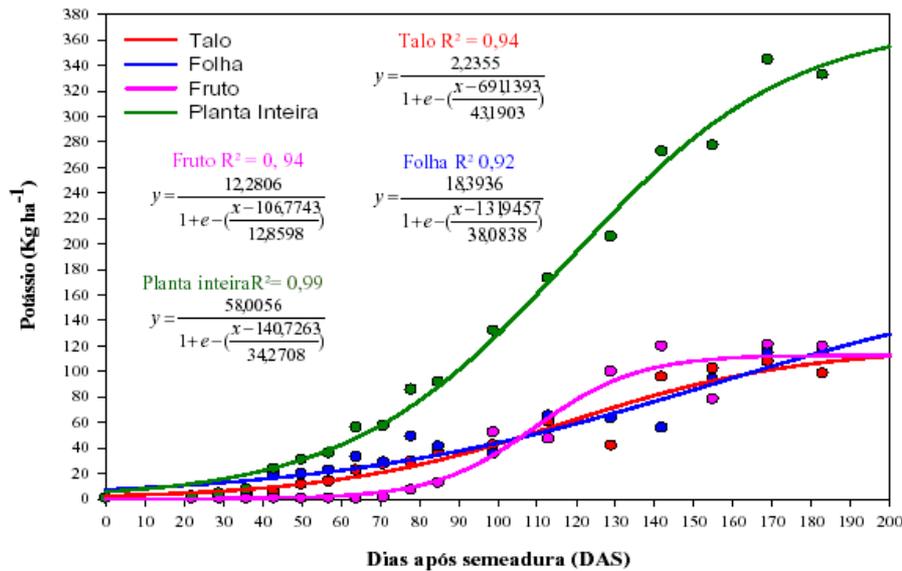


Figura 3. Marcha de absorção de N, P e K na fitomassa (planta inteira, talo, folha e fruto) do feijão-de-porco, no período de outubro de 2005 a abril de 2006. Chapecó- SC, 2006.

Assim, estudos de marcha de absorção, são importantes, pois permitem detectar em que fase de desenvolvimento a cultura apresenta maior exigência de um determinado nutriente, ou seja, em qual fase tem-se a maior velocidade de absorção do nutriente. Logo, diante desta informação, pode-se prever com antecedência o momento da aplicação do nutriente para satisfazer à exigência nutricional no respectivo estágio de desenvolvimento da cultura.

Por fim, a exigência nutricional das culturas é específica para a espécie e até mesmo para a cultivar/variedade de uma mesma espécie. Dessa forma, serão discutidas para cada nutriente estas diferenças nutricionais entre as culturas, durante a apresentação dos capítulos. Assim, para garantir a máxima eficiência da adubação, ou seja, o momento mais adequado para a aplicação do nutriente/fertilizante, é preciso conhecer, além da planta, a marcha de absorção dos nutrientes, e também outros fatores ambientais, como solo (textura), água (irrigado ou não-irrigado) e sistema de cultivo (convencional ou semeadura direta).

1.5 Elementos químicos benéficos e tóxicos às plantas

Além dos elementos ditos essenciais à vida das plantas, existem outros considerados benéficos e, também, o grupo dos elementos tóxicos. Quanto ao **elemento benéfico**, este é definido como aquele que estimula o crescimento dos vegetais, mas que não são essenciais ou que são essenciais somente para certas espécies ou sob determinadas condições (Marschner, 1986). O silício e o cobalto são considerados benéficos ao crescimento de certas plantas, bem como o Na, o Ni e o Se. Entretanto, Malavolta (2006) considera como benéficos apenas o Si e o Na. Salienta-se que, mesmo um nutriente ou elemento benéfico, quando presente em concentrações elevadas na solução do solo, poderá ser tóxico às plantas. Entretanto, é considerado um **elemento tóxico**, não se enquadrando como um nutriente ou elemento benéfico. Desse modo, os elementos tóxicos, mesmo em concentrações baixas no ambiente, podem apresentar alto potencial maléfico, acumulando-se na cadeia trófica e diminuindo o crescimento, podendo levar à morte do vegetal. Como exemplo, têm-se: Al, Cd, Pb, Hg, etc. E o potencial maléfico desses elementos depende da dose.

O alumínio tem sido muito estudado, tendo em vista que os solos tropicais têm reação ácida com alta concentração do Al^{+3} tóxico, pois, em baixa concentração ($0,2 \text{ mg L}^{-1}$), pode até reduzir a toxicidade de outros elementos (Cu, Mn). Normalmente, o excesso de Al nos solos promove a toxicidade nas plantas, constituindo o principal fator limitante à produção de alimentos e a biomassa no mundo (Vitorello et al., 2005). A presença desse elemento pode afetar desde a germinação (Marin et al., 2004), até o crescimento das raízes, interferindo na absorção de nutrientes (como P, Mg, Ca e K) (Freitas et al., 2006). O estresse com alumínio aumenta a massa molecular de hemicelulose da parede celular, deixando-a rígida, inibindo o alongamento das raízes (Zakir hossain et al., 2006) e também o maior vazamento das membranas; entretanto, isso pode ser a consequência à exposição do elemento e não a causa dos prejuízos no crescimento das raízes (Yamamoto et al., 2002).

Os sintomas de toxicidade de Al provocam engrossamento das raízes, tornando-as curtas, com aspecto quebradiço, podendo desenvolver coloração castanha (Furlani & Clark, 1981). Na parte aérea, os sintomas de toxicidade de Al podem não ser claramente identificáveis, podendo inclusive ser confundidos com desbalanço nutricional (P, Ca, Fe ou Mn). Segundo Malavolta (1980), é semelhante à deficiência de P e K, ou seja, amarelecimento da margem e secamento das folhas. O efeito do Al na parte aérea, no aspecto nutricional ou no déficit hídrico pode ocorrer pelo bloqueio dos plasmodesmos (impedindo transporte de solutos e água, via simplasto), induzido pela produção de calose, um políssacarídeo, que as plantas produzem no floema quando submetidas a um estresse de natureza patogênica ou ambiental (temperatura, Al ou Ca no citosol).

Assim, uma linha de pesquisa da nutrição de plantas busca selecionar genótipos tolerantes e os mecanismos que as plantas utilizam para atenuar o efeito tóxico do elemento. Neste sentido, Jo et al. (1997) indicam dois tipos de mecanismos de que as plantas tolerantes ao Al dispõem, tais como: i) mecanismos externos, em que as plantas tolerantes liberam ácidos orgânicos pela raiz, geralmente citrato e malato, que se ligam ao alumínio, formando complexos estáveis e impedindo a absorção pela planta; ii) mecanismos internos, em que o alumínio é absorvido para o interior da planta e, conseqüentemente, para a célula, onde é inativado por alguma enzima ou isolado no interior do vacúolo. Acrescenta-se que normalmente, o Al pode formar quelatos a partir da cisteína de dois tipos: fitoquelatinas ou metalotioneínas. Jemo et al. (2007) notaram em feijão-caupi que o Al induz a formação de calose e diminui a absorção de P, especialmente nas cultivares suscetíveis ao Al (95%), comparado às cultivares resistentes (28%). E a taxa de exsudação do citrato pelas raízes é maior em plantas com nível suficiente de P, que em plantas com nível deficiente de P. O genótipo resistente ao Al apresenta maior taxa de liberação de citrato na presença do Al.

Além do Al, outros elementos tóxicos são muito estudados, buscando conhecer os mecanismos que as plantas tolerantes desempenham para minimizar o efeito maléfico.

As plantas submetidas a altas doses de Al podem aumentar o conteúdo de um aminoácido, a prolina livre, podendo ser um indicador do estresse causado por este íon (Satakopan et al., 1990).

Menosso et al. (2001) observaram que cultivares de soja consideradas tolerantes ao Al podem ser diferenciadas das sensíveis pelo maior acúmulo de ácido orgânico (cítrico). Assim, existem estudos com

forrageiras, visando a selecionar cultivares tolerantes ao Al, a partir da retomada de crescimento da raiz após estresse com Al, a exemplo da aveia-preta, onde Silva et al. (2006), a partir de dez cultivares, selecionaram três tolerantes ao elemento (UPF17; UFRGS 20; URS 21). Estes trabalhos são importantes, visando a selecionar cultivares destinadas às áreas de solos de reação ácida, a fim de minimizar os prejuízos do Al tóxico na produção das plantas.

Um dos elementos benéficos, mais estudados ultimamente no Brasil é o silício. As plantas, normalmente, absorvem o silício na forma de ácido (H_4SiO_4) com gasto de energia (ativo) (Rains et al., 2006) e em seguida, interagem com a pectina, que se deposita na parede celular, ficando praticamente imóvel na planta. Na literatura, existe indicação da divisão das plantas quanto à capacidade de acumulação desse elemento, conforme sugere Marschner (1995). **Plantas acumuladoras:** contêm teores de 10% a 15% de SiO_2 , sendo exemplo as gramíneas, como o arroz; **plantas intermediárias:** contêm teores de 1% a 5% de SiO_2 , sendo algumas gramíneas e cereais; **plantas não-acumuladoras:** contêm menos de 0,5% de SiO_2 , sendo exemplo a maioria das dicotiledôneas, como as leguminosas.

Miyake & Takahashi (1985) acrescentam, ainda, que existem outras diferenças nas plantas quanto à absorção de Si, além do seu teor na planta, referente à taxa de transporte. As plantas acumuladoras de Si apresentam alta taxa de transporte, enquanto, nas plantas intermediárias, o transporte é inferior, ao passo que, nas plantas não-acumuladoras, o Si absorvido se concentra nas raízes.

Atualmente, o Si não é considerado um nutriente “universal” das plantas; entretanto, a maioria dos autores colocam-no como benéfico ou, segundo Epstein (2002), utiliza-se o termo *quase-essencial*.

Na literatura, existem muitos relatos dos benefícios do Si nas plantas, mas o mais discutido é sua ação na resistência às doenças fúngicas em diversas culturas, especialmente em gramíneas. Além disso, também promove a redução da incidência de pragas, pela maior dificuldade de alimentação delas, maior desgaste das mandíbulas e aumento da taxa de mortalidade (Goussain et al., 2002).

Esse efeito do Si na redução de doenças ocorre não apenas por um fator físico (formação de compostos que agem como barreira física abaixo da cutícula das folhas), como também químico (formação de compostos fitotóxicos aos patógenos). Salienta-se que os estudos recentes têm indicado que as plantas ricas em Si podem apresentar “buracos” na epiderme, sem a proteção física, de forma que os estudos que buscam isolar os compostos químicos produzidos pelas plantas, têm sido um desafio aos fitopatologistas.

Apenas a título de ilustração, os efeitos do Si nas plantas, apresentados na literatura, podem ser resumidos em:

- Aumento da rigidez da célula devido à maior produção de compostos como a lignina;
- Maior rigidez celular, que melhora a arquitetura foliar da planta e favorece a fotossíntese;
- Aumenta a resistência das plantas a doenças fúngicas;
- Reduz a taxa de senescência foliar (Prado & Fernandes, 2000b);
- Alivia a toxicidade de Fe, Mn e Al em plantas cultivadas em solos com altos teores destes elementos e redução do estresse salino;
- Maior utilização do P;

- Redução da transpiração excessiva, e
- Melhora a taxa de fertilidade da planta.

Quando se compara a composição química de plantas acumuladoras de Si, como a cana-de-açúcar, observa-se que esse é o elemento mais acumulado pela planta. Em cana-de-açúcar, pode ocorrer efeito benéfico do Si, a exemplo da aplicação de escória de siderurgia, como fonte de Si, que promoveu efeito linear na produção de colmos (Prado & Fernandes, 2001a; Prado et al., 2003a) e na produção de matéria seca da parte aérea do capim-marandú (Fonseca, 2007) e dos capins tanzânia e marandú (Fortes et al., 2008). Eneji et al. (2005) verificaram que o Si promoveu economia de água em capim-rohodes e no sorgo. Nanayakkara et al.(2008) observaram que a absorção de Si em forrageira (*Lolium perenne*) é influenciada pelo tipo de solo e pela fonte e dose de silício aplicado.

As forrageiras, como a braquiária, são consideradas plantas acumuladoras de silício (Figura 4) (Melo et al., 2003).

Salienta-se que a resposta das plantas ao silício é mais significativa em sistemas de produção com algum tipo de estresse, seja biótico (doenças/pragas; cultivar pouco ereta, etc), seja abiótico (déficit hídrico; excesso de metais, como Al, etc.). E em plantas forrageiras, é importante, também, estudo sobre os efeitos do silício no consumo e conversão animal, para se ter com maior profundidade os benefícios no sistema planta-animal.

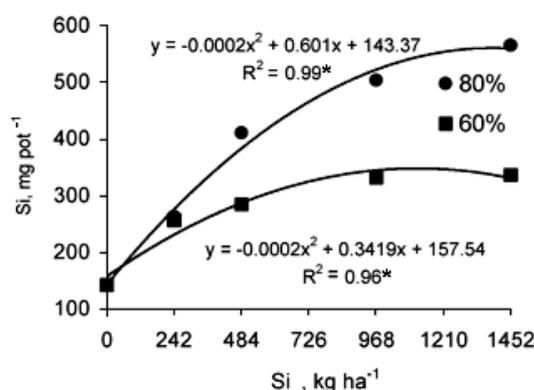


Figura 4. Efeito da aplicação de Si no acúmulo na parte aérea da braquiária (médias *B. Decubens* e *B. Brizantha*), cultivada sob dois regimes hídricos, 60 e 80% da capacidade de campo (Melo et al.,2003).

Lima Filho & Tsai (2007) observaram que a aplicação de Si incrementou a produção e o número de grãos da aveia-branca, cultivares URS 21 e UFRGS 17, cultivada em solução nutritiva.

Observa-se, ainda, que, considerando-se o aspecto nutricional da planta, o silício é o único elemento que não causa injúrias às plantas quando acumulado em excesso, devido às suas propriedades de não-dissociação em pH fisiológico e à polimerização (Ma et al., 2001).

O sódio também é considerado elemento benéfico, embora uma halófito (*Atriplex vesicaria*), tolerante à salinidade, tenha-se apresentado como um nutriente, segundo Brownell & Wood (1957). E em outras com efeito benéfico, como aspargo, cevada, brócoli, cenoura, algodão, tomate, trigo, ervilha, aveia e alface (Subbrao et al., 2003). Um dos aspectos importantes do sódio é sua capacidade de substituir parte do

K em funções não-específicas, como o K vacuolar, quando o suprimento deste é limitado. Desse modo, o Na substituiria o K em sua contribuição ao potencial de soluto e, conseqüentemente, na geração do turgor celular. Isto ocorre de forma significativa, apenas em grupo específico de plantas, como beterraba, espinafre, repolho, coqueiro, algodão, couve, tremoço e aveia (Lehr, 1953). Nessas culturas, há possibilidade do uso de fertilizantes potássicos com maior proporção de sódio (menor custo), em solos não-sódicos. Além disso, é indicado que Na pode afetar a fotossíntese, especialmente em plantas C4, embora esse papel não esteja totalmente esclarecido, embora exista indicações de que o Na participaria no aumento da concentração de CO₂ e da integridade dos cloroplastos nas células do mesófilo da bainha (Brownell & Bieligi, 1996) e também na regeneração do PEP no cloroplasto e na síntese de clorofila. Entretanto, em altas concentrações, o Na pode prejudicar a ação enzimática do K, desalojando-o dos sítios de ação das enzimas.

Por fim, existem estudos indicando a essencialidade do níquel (em baixas concentrações) em algumas espécies, a exemplo da cevada, demonstrados por Brown et al. (1987). Salienta-se que, muitas vezes, a quantidade de Ni contida nas sementes atende à exigência destes grupos de plantas. Os estudos indicam que o Ni faz parte da urease, onde as plantas supridas de N (uréia), via foliar, podem não assimilar o N, acumulando-se uréia, provocando toxicidade, e outros trabalhos indicam efeito benéfico no aumento do vigor de sementes. Entretanto, em plantas supridas com outras fontes de N (sulfato de amônio, nitrato de amônio) e nas leguminosas com FBN, esse efeito do Ni na ação da urease é desnecessário e não afetaria a produção.

1.6 Princípios para o cultivo de plantas em solução nutritiva (pesquisa)

O termo hidroponia (do grego: hydro = água e ponos = trabalho) é relativamente novo, designado como cultivo sem solo. Ultimamente, o sistema de cultivo alternativo, via hidroponia, pode otimizar a produção com maior número de safras por ano e, conseqüentemente, maior produção, comparado ao sistema convencional (Tabela 3). Entretanto, a aplicação do cultivo hidropônico está restrita às culturas de ciclo rápido e porte baixo.

Em cultivo comercial, a hidroponia pode ser utilizada na produção de culturas nobres de alta qualidade (livres de microorganismos, defensivos), com maior valor agregado ao produto, como as plantas utilizadas como banco de proteínas.

A forragem hidropônica não tenta competir com sistemas tradicionais de produção de pastagem, mas surge como complementação, especialmente durante períodos de déficit (FAO, 2001). O cultivo de forragem hidropônica é uma tecnologia de produção de fitomassa obtida por meio da germinação de sementes viáveis e do crescimento inicial de plantas (FAO, 2001).

Esse tipo de cultivo destaca-se por ser constituído de plantas de crescimento acelerado, com ciclo curto de produção, elevado rendimento de fitomassa fresca e excelente qualidade nutricional, por se encontrar em fase inicial de formação, contendo grande quantidade de aminoácidos livres, que serão facilmente aproveitados pelos animais (SANDIA, 2003). Pode-se produzir forragem hidropônica de espécies

como arroz, aveia, cevada, centeio, milheto, milho, trigo, sorgo, em diversas condições ambientais. Henriques (2000) complementa que, na produção de forragem hidropônica, colheitas precoces podem resultar em baixo rendimento por área; entretanto, colheitas tardias podem acarretar grande competição entre plantas e perda de qualidade nutricional. Assim, sob condições favoráveis, a colheita deve ser feita entre 16 e 20 dias. Muller et al. (2006) acrescentam que o cultivo da forragem hidropônica de milheto, com densidade de semeadura de 2kg m^{-2} , e a colheita aos 10 dias após o plantio de sementes 'pré-germinadas' proporcionaram boa produção com qualidade nutricional.

O cultivo hidropônico pode apresentar algumas vantagens e desvantagens, tais como:

Vantagens:

- a) Exige menos trabalho operacional;
- b) Elimina o preparo do solo (gastos com combustível e de aquisição de máquinas);
- c) Elimina a rotação de culturas;
- d) Reutiliza o meio de cultivo;
- e) Aumenta a produção, sem a competição por nutrientes e água;
- f) Produz plantas uniformes quanto ao desenvolvimento;
- g) Melhora o desenvolvimento radicular com maior qualidade e aumenta a vida de prateleira dos produtos;
- h) Baixa a perda de água e de nutrientes;
- i) Reduz a incidência de pragas e doenças (queda na pulverização);
- j) Melhora o aproveitamento da área agrícola;
- l) Implanta a cultura sem restrição ao tipo de área (solos rasos, baixa drenagem ou alta declividade);
- m) Torna-se imune a adversidades climáticas (geada/granizo).

Desvantagens:

- a) Elevados custos e trabalhos iniciais;
- b) Maior risco de perdas por falta de energia elétrica em sistemas automáticos;
- c) Exigência da habilidade técnica e conhecimentos de fisiologia vegetal;
- d) Balanço inadequado da solução nutritiva pode causar graves problemas às plantas;
- e) Necessidade de suporte às raízes e estruturas aéreas;
- f) Somente materiais inertes devem entrar em contato com as plantas;
- g) Rotinas regulares;
- h) Boa drenagem para não haver morte das raízes;
- i) Contaminação da água afeta todo o sistema.

Na pesquisa, a hidroponia pode ser utilizada em diversos estudos, como:

- a) Demonstração da essencialidade de nutrientes;
- b) Definição de sintomatologia de desordem nutricional, seja por deficiência, seja por excesso (toxicidade);
- c) Conhecimento da exigência nutricional das plantas;
- d) Seleção de plantas tolerantes a estresse nutricional;

- e) Mecanismos de absorção, transporte e redistribuição iônica;
- f) Controle de doenças;
- g) Qualidade de produtos em hidroponia (ex.: acúmulo de nitrato).

Para o cultivo hidropônico, o uso adequado da solução nutritiva é fundamental para o sucesso do cultivo, seja para fins experimentais, seja para comercial. A solução nutritiva é um sistema homogêneo, com os nutrientes dispersos, na forma iônica ou molecular, em proporções e quantidades adequadas, assim como o oxigênio. Após a solução nutritiva entrar em contato com as raízes das plantas, sua homogeneidade é alterada, pois tem-se a presença de compostos orgânicos provindos da atividade microbiana, especialmente da decomposição de fragmentos de raízes ou outras impurezas (vindos com a planta ou do sistema hidropônico), ou, ainda, o próprio exsudato de ácidos orgânicos das raízes.

Um dos estudos clássicos na área de nutrição empregando a hidroponia é o uso da técnica de indução de deficiência ou técnica do elemento faltante. O uso dessa técnica, inclusive, foi muito utilizada para investigar as funções dos nutrientes nas plantas, a partir dos efeitos da falta do nutriente na atividade bioquímica relacionados ao metabolismo de diversas reações das plantas. Nessa técnica, utiliza-se uma solução completa menos o nutriente em estudo, cultivando a planta até o aparecimento da sintomatologia característica do elemento faltante, que identifica a deficiência (Figura 5). Inicialmente, retira-se o nutriente do meio de cultivo e, em seguida, a planta tenta compensar utilizando suas reservas (Vouillot & Devienne-Barret, 1999), e persistindo a deficiência, iniciam-se diversas alterações e reações bioquímicas. Assim, a planta submetida ao estresse, como o nutricional, tenta a aclimatação, com sérias alterações no sistema hormonal (Morgan, 1990). E se o estresse prosseguir, ocorre uma série de eventos antes de a injúria ser visível, e se ocorrer, este será o último evento biológico, ou seja, já a nível de tecido (Figura 6), e, nesta fase, a metade da produção deverá estar comprometida. A forma da sintomatologia é dependente da função que o respectivo nutriente desempenha na planta, e o local de ocorrência (folha velha ou nova) depende da sua mobilidade no floema das plantas.

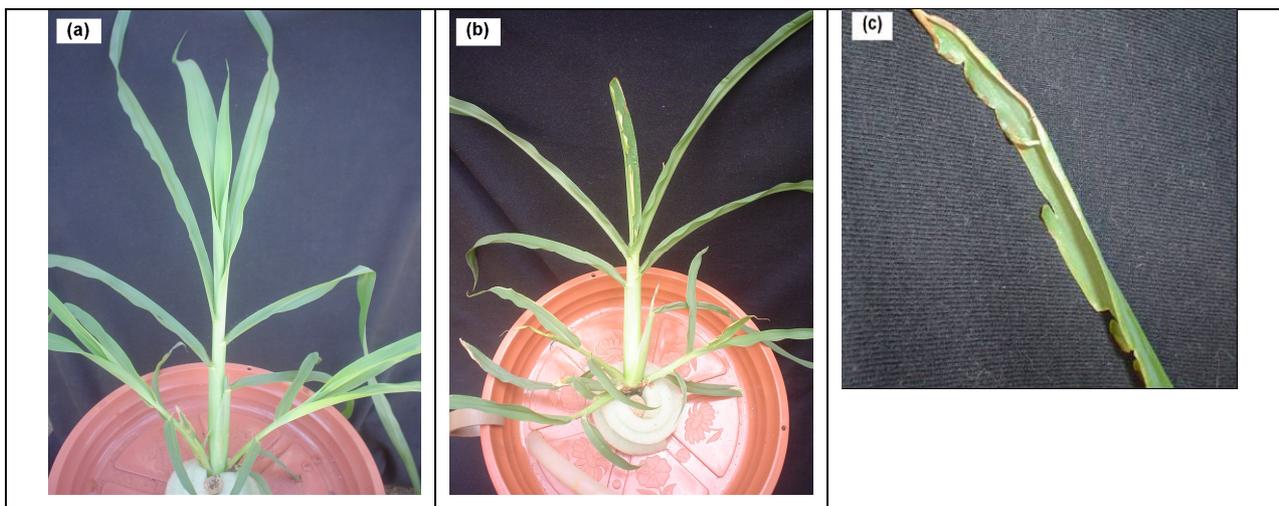


Figura 5. Capim-elefante cultivado em solução nutritiva com todos os nutrientes (completo), com crescimento normal (a), e o completo menos o cálcio (b), demonstrando os sintomas visuais de deficiência com detalhe da folha nova dilacerada (c).

Além da descrição da sintomatologia, acompanha-se o comportamento das plantas ao longo do cultivo. Isto é feito por meio do desenvolvimento das plantas cultivadas na solução completa e da deficiente (geralmente com omissão total ou com 10% dos níveis adequados), a partir de avaliações de crescimento (altura, diâmetro do caule, área foliar e matéria seca). Algumas plantas são sensíveis à deficiência e ao excesso de nutrientes. Assim, existem as plantas indicadores de deficiência dos nutrientes, como para o N (milho, maçã), o P (cevada), o Ca (alfafa), o S (alfafa), o B (nabo, aipo) (Malavolta et al., 1997) e para o Fe (sorgo). Desse modo, na literatura, existem diversos trabalhos com a omissão de nutrientes e os reflexos característicos na desordem nutricional e na produção, em culturas como braquiária (Monteiro et al., 1995), capim-gordura (Saraiva et al., 1993), capim-centenário (Costa e Paulino, 2007), capim-tifton (Sarmiento et al., 2006), sorgo (Santi et al., 2006), milho (Coelho et al., 2002; Prado & Franco, 2007), girassol (Prado & Leal, 2006) e cana-de-açúcar (Silveira et al., 1989; Mccray et al., 2006).

Observa-se que a disponibilidade de nutrientes afeta inclusive a partição de carboidratos, cuja a extensão do efeito é dependente do nutriente. Neste sentido, alguns trabalhos indicam que a baixa disponibilidade de N, P e S favorece o crescimento radicular, enquanto níveis deficientes de K, Mg e Mn determinam efeito contrário; Ca, Fe e Zn praticamente não apresentam efeito sobre a partição de carboidratos (McDonald et al., 1996). E também a desordem nutricional pode promover desvios no metabolismo vegetal, metabólitos primários (carboidratos) em metabólitos secundários (compostos fenólicos). Os efeitos desses compostos nas plantas é discutido, havendo indicações de que esses compostos fenólicos podem auxiliar na diminuição da incidência de doenças; entretanto, poderão afetar a qualidade da forrageira. Lima Filho & Abdalla (2005) estudaram os efeitos da desordem nutricional na produção de fenóis e taninos em plantas forrageiras (guandu e leucena). Os resultados obtidos demonstram que solos com deficiência de nitrogênio, potássio, cálcio, enxofre, boro, manganês e excesso de cobre, ferro, manganês e zinco tendem a contribuir para que as plantas produzam mais compostos fenólicos, ao passo que a deficiência de magnésio e cobre, além do excesso de boro, pode induzir as plantas a sintetizarem menos fenóis.

As técnicas de cultivo, sem solo, podem ser divididas em várias categorias, em função dos substratos (material distinto do solo) utilizados (Castellane & Araújo, 1995):

- Cultura em água ou hidroponia: as raízes das plantas são imersas em uma solução formada por água e nutrientes, denominada solução nutritiva em NFT (Técnica do Filme de Nutrientes);
- Cultura em areia: as plantas são sustentadas por um substrato sólido, partículas de diâmetro com 0,6 e 3,0 mm;
- Cultura em cascalho: o substrato é sólido, partículas de diâmetro maior que 3 mm;
- Cultura em vermiculita: quando o substrato utilizado é a vermiculita ou a sua mistura com outros materiais;
- Cultura em lã de rocha: utiliza como substrato a lã de rocha, lã-de-vidro ou outro material semelhante (alta porosidade e absorção de água, nutrientes e ar próximo às raízes). A lã de rocha tem inconveniente com relação ao aspecto ambiental, na época do descarte, visto que sua decomposição é muito lenta.

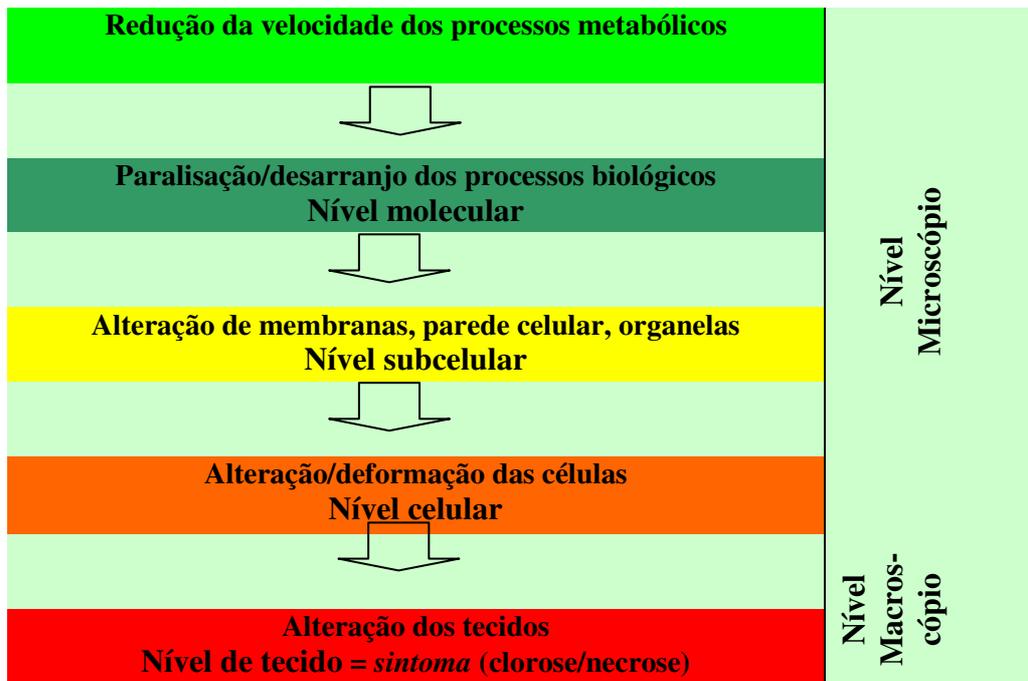


Figura 6. Seqüência de eventos biológicos em plantas deficientes de nutriente.

Salienta-se que, em estudos de nutrição de plantas, o cultivo em solução nutritiva, sem uso de componentes sólidos, é a técnica mais utilizada pelos pesquisadores da área.

Em tese, é difícil considerar que uma solução nutritiva seja ideal para todas as culturas, que apresente formulação que garanta um desenvolvimento máximo e que todos os nutrientes sejam fornecidos exatamente na proporção em que são absorvidos. Sendo assim, a composição da solução nutritiva é influenciada por uma série de fatores: espécie de planta cultivada (exigência nutricional é geneticamente controlada); • idade da planta e estágio de crescimento; • época do ano (duração do período de luz); • fatores ambientais (temperatura, umidade, luminosidade); • parte da planta colhida, etc. Para o cálculo da composição química da solução nutritiva, tem de se considerar além da exigência da cultura ao longo do cultivo, o ambiente, pois este afetaria a luminosidade e a temperatura, com reflexos diretos na taxa de transpiração. A taxa de transpiração é importante tendo em vista que condições que favoreçam a alta transpiração, elevariam a perda de água da solução em velocidade superior à absorção de nutrientes, podendo ocasionar efeito salino. Desse modo, quanto maior a taxa de transpiração prevista para a cultura, menor deverá ser a concentração dos nutrientes na solução nutritiva. Por exemplo, considerando uma cultura qualquer que exige um teor de N adequado igual a 50 g kg^{-1} de matéria seca, associado a uma transpiração de 300 L kg^{-1} de matéria seca, teria 50 g de K em 300 L de água, ou 166 mg L^{-1} de K. Ao passo que, se a taxa de transpiração for de 400 L kg^{-1} , a solução necessitaria ser diluída, ou seja, 50 g por 400 L, ou 125 mg L^{-1} de K.

Assim, a composição química ou a formulação ideal da solução nutritiva é aquela que atende às exigências nutricionais da espécie cultivada em todas as fases do ciclo de produção. A solução nutritiva pode apresentar, além dos nutrientes, outros elementos, podendo atingir cerca de 20 elementos (Jones Jr., 1998).

Cerca de uma centena de soluções nutritivas indicadas da literatura foram derivadas da solução de Hoagland & Arnon (1950), modificada ($\text{N-NO}_3^- + \text{NH}_4^+$) (Tabela 8), considerada uma das que apresentam maior concentração de sais, entretanto apresenta baixa concentração de Fe Mn, que pode afetar plantas

exigentes, como gramíneas. Salienta-se que todas as soluções nutritivas fornecem os elementos essenciais às plantas.

Na literatura, a concentração dos nutrientes indicada para formular a solução nutritiva é muito variável, independentemente do nutriente, como (em mg L⁻¹), N-NO₃⁻: 70 a 250; N-NH₄⁺: 0 a 33; P: 15 a 80; K: 150 a 400; Ca: 70 a 200; Mg: 15 a 80; S: 20 a 200, B: 0,1 a 0,6; Cu: 0,05 a 0,3; Fe: 0,8 a 6,0; Mn: 0,5 a 2,0; Mo: 0,01 a 0,15; Zn: 0,05 a 0,5 e Cl: 1 a 188 (Cometti et al., 2006).

A solução nutritiva apresentada (Tabela 3), em concentração integral (100%), é utilizada em plantas já com certo desenvolvimento ou em época muito fria, pois, em plantas jovens, em estádios iniciais de crescimento, essas soluções estão muito concentradas, com risco de danos fisiológicos (efeito salino) às plantas. Assim, no início do crescimento, utilizam-se as soluções diluídas (25 até 75%) e, à medida que a planta se desenvolve, empregam-se soluções menos diluídas, até atingir a concentração integral (100%).

Além dos nutrientes, pode utilizar-se, ainda, o elemento benéfico na solução nutritiva, a exemplo do Si. Assim, a concentração utilizada de Si é de 0,5 mmol L⁻¹, na forma de Na₂SiO₃·9 H₂O, devendo ser adicionado primeiro, mantendo neste momento pH da solução baixo (Epstein, 1995).

Em estudos básicos de nutrição de plantas, usando solução nutritiva, nem sempre a concentração do elemento na solução pode não explicar o crescimento das plantas. Isso ocorre porque a disponibilidade do íon para absorção da planta, ou seja, sua atividade na solução, pode ser influenciada por diversos fatores, desde a força iônica da solução, até o valor pH e os tipos de quelatos (Cometti et al., 2006). A força iônica é mais importante em trabalhos com metais pesados, e em especial o Al, onde a atividade do íon é reduzida pelo aumento da força iônica. Em solução nutritiva, diferentemente da solução do solo, existe variação alta no pH ao longo do cultivo, o que pode alterar as formas livres e complexadas do elemento. Em valor pH alto (>6,0), promove redução da disponibilidade dos macronutrientes Ca e P, e dos micronutrientes Mn, Cu, Zn e B, pela formação de precipitados, além de reduzir o transporte do nutriente para o interior das células. O uso de quelatos de Fe na solução pode levar à quelação do Cu, Zn e Mn. Assim, o uso do quelato FeEDDHA promoverá, em parte, apenas a quelação do Cu, ao passo que o uso do quelato DTPA ou EDTA também forma complexos com Zn e Mn, especialmente em valor pH>5,5 para o Zn e pH>7,0 para o Mn. Isso é importante, porque os micronutrientes Cu, Mn e Zn são absorvidos na forma livre. Portanto, a qualidade do quelato de Fe pode afetar e induzir a deficiência de Fe e também de outros micros (Zn, Mn e Cu).

Tabela 3. Composição química de algumas soluções nutritivas (Castellane & Araújo, 1995; Furlani, 1995 e Hoagland & Arnon, 1950) e a solubilidade em água (fria e quente) e índice salino.

Componentes	Castellane & Araújo (1995)	Furlani (1995)	Hoagland & Arnon (1950) ²	Solubilidade ³ (g L ⁻¹)(0,5 e 100°C)	Índice salino
	g/1000 L de solução				
Nitrato de cálcio	950	1000	1200	1212 e 6598	53
Monoamônio fosfato (MAP)	-	150	150	224 e 1730	30
Fosfato MB. de potássio (MKP)	272	-			
Cloreto de potássio	-	150	250	277 e 561	116
Nitrato de potássio	900	600	260	134 e 2471	74
Sulfato de magnésio	246	250	500	700 e 906	2
Cloreto de manganês	-	1,17			
Sulfato de manganês	1,70	-			
Sulfato de zinco	1,15	0,44			
Sulfato de cobre	0,19	0,10			
Ácido bórico	2,85	1,02		19,5 e b389	
Molibdato de sódio	0,12	0,13			
Ferro-EDTA ¹	1 (L)	0,5 (L)			

¹Em ambas as soluções, utilizaram-se Fe-EDTA como fonte de ferro, obtido pela dissolução de 24,1 g de sulfato de ferro em 400 mL de água e 25,1 g sódio-EDTA em 400 mL de água quente (80°C), misturando-se as duas soluções frias, completando o volume para 1 L. Existem outros quelatos com maior estabilidade na solução (Fe-EDDHA). ² Solução de micronutrientes (L/1000 L de solução) e de Fe-EDTA (L/1000 L de solução). ³ Resh (2002). Obs. Solubilidade de outros sais (em g L⁻¹): nitrato de amônio (1183 e 8711); fosfato diamônio (426 e 1063); sulfato de amônio (704 e 1033); sulfato de magnésio (700 e 906); sulfato de potássio (67 e 239).

Desse modo, para a escolha da solução adequada, é preciso considerar os fatores de manejo da solução nutritiva, visando a aumentar a eficiência produtiva de sistemas hidropônicos, tais como:

Fontes de fertilizantes

As fontes de nutrientes a serem utilizadas dependem da natureza do cultivo, sendo permitidas fontes de fertilizantes comerciais para o cultivo comercial e, também, fontes p.a. (pró-análise), com alto grau de pureza, destinadas especialmente em pesquisas básicas na área de nutrição de plantas. Salienta-se que, nas fontes p.a, adquirir de empresas idôneas e atentar para escolha de produtos livres de inertes que apresentem outros elementos em sua composição, que podem comprometer os resultados e o rigor científico do trabalho.

Como fonte de Mo, usar molibdato de amônio ou ácido molíbdico, pois o molibdato de sódio é muito alcalino, podendo ocorrer reações de precipitação com outros micros.

Água

Em hidroponia comercial, pode ser utilizada água potável, enquanto, em hidroponia científica, utiliza-se, em geral, a água destilada; entretanto, em alguns casos, é melhor a água deionizada (até 2 vezes), a exemplo de ensaios cujo objetivo é induzir deficiência nutricional, especialmente de micronutrientes.

Caso a água seja da rede urbana, é conveniente deixá-la em repouso por cerca de 24 horas para a eliminação do cloro usado em seu tratamento (Martinez & Silva Filho, 2004).

Ordem de adição dos nutrientes

Para evitar reações de precipitação de fertilizantes (pouco solúveis) que tornariam indisponíveis para as plantas, é necessário seguir determinada ordem de adição dos nutrientes. Antes da adição dos fertilizantes (nutrientes), deve-se acertar o valor pH da água a padrões adequados (discutido no item subsequente).

a) Adicionar os fertilizantes à base de macronutrientes sem cálcio, como fosfato de potássio, nitrato de potássio e sulfato de magnésio. Esse procedimento é necessário devido à incompatibilidade entre nitrato de cálcio e os sais contendo fósforo e enxofre, formando compostos precipitados de baixa solubilidade;

b) Sais de cálcio (nitrato de cálcio);

c) Micronutrientes sem ferro, como fontes de fertilizantes à base de Mn, Zn, Cu, B e Mo;

d) Fonte de ferro (Fe-EDTA, Fe-EDDHA ou outro).

Em seguida, efetuar imediatamente o ajuste do valor pH e fazer a determinação da CE (condutividade elétrica) (discutido no item subsequente).

Assim, para ser formulada solução-estoque, é necessário ter solução A à base de nitrato de cálcio e outra de B com demais macronutrientes, e C para os micronutrientes.

Manutenção do pH adequado da solução nutritiva

Quanto à questão do pH, tem-se:

a) Calibrar o aparelho antes de cada medição;

b) Ajuste diário, visando a manter o valor pH da solução na faixa 5,5-6,5. Em caso de valor pH acima desta faixa, adicionar “gotas” de um ácido a 0,1 M (HCl; HNO₃, H₂SO₄; H₃PO₄) ou, caso contrário, adicionar uma base a 0,1M (NaOH; KOH). Entretanto, o melhor ajuste do valor pH da solução é o manejo de fontes do nitrogênio (NO₃⁻ ou NH₄⁺) da solução nutritiva. Para isso, tem sido adotado parte do N na forma NH₄⁺ na proporção de 10-20% do N total. O uso da solução com N, na forma de amônio e nitrato, poderá inicialmente diminuir o valor pH, até o momento em que praticamente todo o amônio da solução tivesse sido absorvido pela planta e, na seqüência, tem-se maior absorção de nitrato e aumento do valor pH (Silva et al., 2002). O manejo do pH da solução é importante, porque valores baixos (~3-4) afetam a integridade das membranas (H⁺ afeta as células, a permeabilidade das membranas), podendo haver perda de nutrientes já absorvidos e também afeta a disponibilidade de cátions. Em solução com pH alto (>6,5), pode haver problemas no gradiente eletroquímico e cotransporte de próton/ânion pelas membranas, além de haver perda de compostos fenólicos e de eletrólitos das células, e também diminui a absorção de ânions. E, indiretamente, o pH elevado afeta reações químicas indesejadas na solução, podendo levar a deficiências nutricionais nas plantas (Fe, Mn, B e P).

Manutenção da pressão osmótica adequada da solução nutritiva

A pressão osmótica da solução nutritiva deve estar na faixa de 0,5-1,0 atm, uma vez que valores altos podem indicar excesso de sais na solução, com danos sérios às raízes.

Manutenção da temperatura adequada da solução nutritiva

Para evitar aquecimento da solução nutritiva (>25-30°C), é importante evitar a incidência de luz na mesma, mantendo-a em local sombreado e ventilado. Salienta-se, ainda, que a incidência de luz na solução permite a proliferação de algas na solução.

Manutenção da oxigenação da solução nutritiva

É consenso que a oxigenação da solução nutritiva é obrigatória para manutenção de teor de O₂ adequado às raízes (~3 ppm de O₂). O nível adequado de oxigenação pode variar em função da cultura, tendo

plantas com baixa exigência (arroz=3 mg L⁻¹ de O₂) e outras com alta exigência (tomateiro = 16 mg L⁻¹ de O₂) de oxigênio na solução nutritiva. Como o aumento da temperatura da solução nutritiva causa diminuição do teor de O₂ dissolvido, é importante evitar altas temperaturas. Esse arejamento é próprio para cada sistema hidropônico, pois apenas a queda no retorno da solução nutritiva ao reservatório ou em caso de vasos isolados, a injeção de ar comprimido pode fornecer o oxigênio necessário às plantas.

Manutenção da CE adequada da solução nutritiva

Durante o cultivo das plantas em solução nutritiva, tem-se o esgotamento dos elementos da solução que pode variar em função do nutriente. Isso ocorre devido as diferenças na taxa de absorção de nutrientes que pode ser rápida (N, P, K e Mn), intermediária (Mg, S, Fe, Zn, Cu e Mo) ou lenta (Ca e B) (Bugbee, 1995). Desse modo, há necessidade de reposição dos nutrientes da solução que pode ser feita utilizando dados da condutividade elétrica.

A condutividade de uma solução eletrolítica é a expressão numérica quantitativa da sua capacidade de transportar a corrente elétrica. Ela é definida como sendo o inverso da resistência elétrica de 1 cm cúbico do líquido, a uma temperatura de 25°C. Convencionou-se que a condutividade elétrica é a unidade equivalente a 1 mhos = 1 Siemens = 10³ mS = 10⁶ μS (mS = miliSiemens; μS = microSiemens).

Normalmente, a CE da solução nutritiva varia de 1,5 a 4,0 mS/cm, em função da solução escolhida para a respectiva cultura. A CE obtida em uma solução nutritiva é a soma da CE de todos os fertilizantes utilizados na formulação dessa solução. Para Castellane & Araújo (1995), é obtido CE de 2,6 a 2,8 mS/cm. Como 1 mS/cm corresponde a 640 ppm de nutrientes, nota-se que o uso desta variável durante o cultivo da cultura, evitaria que a solução nutritiva apresentasse baixa concentração de nutrientes, o que poderia levar à deficiência nutricional. Normalmente, quando a condutividade elétrica é reduzida a um determinado nível da solução inicial (cerca de 30-50%), é recomendável substituí-la. Backes et al. (2004) indicaram a reposição da solução quando ela diminuiu 50% da CE inicial. Em cultivo comercial, pode-se trabalhar utilizando a CE para o manejo da solução nutritiva da seguinte forma (Carmello & Rossi, 1997):

a) Adicionar-se, diariamente, uma quantidade de solução nova, equivalente à quantidade de solução que foi reduzida no recipiente. Após 21 dias, renovar a solução nutritiva se a condutividade atingir 4 mS/cm.

b) Adicionar-se somente água, para repor a quantidade de solução evapotranspirada e acompanhar a condutividade, para quando ela estiver menor que 1 mS/cm, adicionar os sais para recompô-la ou trocá-la. Depois de 21 dias, renovar a solução nutritiva.

Medidas de prevenção de doenças

Com cultivo em sistema hidropônico, poderão ocorrer doenças, especialmente fúngicas; são necessárias medidas de prevenção. Para isso, é importante a desinfecção dos materiais a cada cultivo. Pode ser utilizado o hipoclorito de sódio ou hipoclorito de cálcio, na base de 1000 mg/L ou 10000 mg/L de cloro ativo, respectivamente. Salienta-se a necessidade de enxaguar rigorosamente os materiais, pois resíduos de Cl (>0,5 mg/L) podem promover injúrias nas plantas, especialmente com uso na solução nutritiva de sais amoniacais (Martinez & Silva Filho, 2004).

Além disso, a própria solução nutritiva pode ser desinfetada a partir do processo da pasteurização. A pasteurização ocorre da seguinte forma: aquecer a solução nutritiva a 95 a 105°C por período de 30 segundos, e em seguida, resfriar rapidamente até a temperatura ambiente (em 30 segundos) (Martinez & Silva Filho, 2004).

Capítulo 2 RELAÇÃO DA NUTRIÇÃO DE FORRAGEIRAS E O DESEMPENHO ANIMAL

2.1 Introdução

A produção de carne brasileira tem crescido acentuadamente, atingindo incremento de 71% no período de 1994 a 2006. No ano de 2006, o rebanho era de 205 milhões de cabeças, com abate de 44,4 milhões de cabeças, com produção de carne de 8,9 milhões de toneladas, com consumo per capita de 36,4 kg, com taxa de exportação de 25% gerando US\$3,5 bilhões, sendo maior exportador de carne do mundo (Anuário Brasil de Pecuária, 2006). Assim, nota-se que existem potencial e uma expectativa de crescimento do negócio da carne bovina no Brasil e no mundo, reflexo da maior renda da população. Por outro lado, a rentabilidade dos pecuaristas tem diminuí (menor preço da carne e maior custo de produção), nos últimos anos, implicando a adoção de tecnologias de melhoria do animal e, especialmente, na produção de forragem.

A área de pastagem cultivada no Brasil, que apresenta melhor qualidade que as nativas, predominante, é do gênero da *Brachiária*, sendo 55% da *B. decumbens*, 21% da *B. brizantha*; 8% da *B. humidicula*, e, em seguida, o gênero é o *Panicum*, sendo 7% do *P. maximum* cv. Colômbia comum, 4% do *P. maximum* cv. Tanzânia, Tobiatã, Mombaça, etc., 4% de outros (*Andropogon*, *Hyparrheria*, *Melinis*, *Cynodon*) (Zimmer et al., 1998). E, no Brasil, cerca de 90% da carne bovina é produzida em sistemas em que a alimentação do rebanho está baseada exclusivamente em pastagens (Arruda, 1997).

Apesar da vasta área de pastagem no Brasil, no entanto, elas estão atualmente degradadas. Este quadro decorre de diversos fatores, desde os ligados à planta (forrageira), ao solo, ao clima, ao manejo, ao animal, até as questões de profissionalismo do produtor e econômicas. E também percebe-se que o produtor não está conscientizado do problema, pois atualmente a taxa de recuperação das pastagens por ano é inferior a 10%. Um dos aspectos que poderiam explicar isso, é a utilização limitada de assistência técnica pelos pecuaristas, fato constatado por Luiz e Quirino (2004), que observaram que apenas 29% dos produtores entrevistados possuíam acesso à assistência técnica.

Neste contexto, a produtividade animal é muito baixa, trazendo taxas de retorno insuficientes e até prejuízos ao pecuarista. Assim, nota-se que é preciso incrementar a eficiência do sistema produtivo, para inverter a presente situação. Assim, é conhecido que o uso de pastagens na produção de ruminantes é a forma mais viável economicamente para a alimentação dos animais, especialmente em sistemas de produção

otimizados, com maior oferta de forragem com qualidade e animais com alta eficiência de conversão alimentar.

Desse modo, existe uma relação da disponibilidade de forragem e o ganho de peso de animais (Paulino, 2004). Esse autor verificou que os maiores ganhos diários foram de 500g e 580g, e as disponibilidades de MSV de 1000 kg ha⁻¹ e 900 kg ha⁻¹, respectivamente, para *Brachiaria* e *Panicum* (Figura 7). Em ambos os gêneros, os acúmulos de MSV alcançaram esses pontos no início do verão, isto é, de outubro a dezembro, a quantidade de MSV era o fator que limita o ganho de peso. De janeiro a junho, por outro lado, o valor nutritivo da MSV passou a ser o limitante do ganho de peso. Durante o período seco (maio a setembro), a produção animal foi limitada tanto pela qualidade quanto pela quantidade, pois, durante esse período, as médias das disponibilidades de MSV foram de 750 kg ha⁻¹ e 780 kg ha⁻¹ para *Brachiaria* e *Panicum*, respectivamente. Para garantir a alimentação do animal de forma adequada, é importante o equilíbrio entre a oferta de forragem e a sua qualidade. Assim, é conhecido que com o crescimento da forrageira, tem-se o incremento da produção de biomassa (oferta de forragem), acompanhado da queda na qualidade. Dantas Neto et al. (2000) verificaram diminuição com ajuste linear ($y=16,5-0,098x$, $R^2=0,91^*$) no teor de proteína (%), em função da idade do primeiro corte do capim-buffel. Desse modo, Dall'Agnol et al. (2004) verificaram que a idade de corte aos 63 dias de crescimento do capim-elefante mostrou-se a mais eficiente, combinando bons índices de produção de forragem e de valor nutritivo.

Uma forma de incrementar a sustentabilidade da produção animal seria o emprego de nutrientes via fertilizantes, possibilitando alta eficiência bioeconômica da adubação. Assim, dados da literatura têm indicado efeitos lineares da aplicação de nutrientes no ganho de peso de animais, a exemplo do nitrogênio em pastagem de milho (Moojen et al., 1999).

Portanto, existe uma relação direta da adubação com o ganho de peso. Neste sentido, Macedo (2004) indica que a adubação fosfatada de manutenção da pastagem de 20-30; 30-50 e 50-70 kg P₂O₅ ha⁻¹ ano⁻¹ para animais (em engorda ou cria), com expectativa de atingir peso vivo de 350-450; 450-850 e >850 kg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente. As gramíneas respondem de forma linear a doses de até 400 kg/ha de N, sendo esperadas eficiências na faixa de 2 a 3 arrobas para cada 30 kg de N aplicado no pasto (ANDRADE et al., 2002).

Normalmente, a aplicação de nutrientes em pastagem, de forma geral, incrementa significativamente a produção da forragem, cerca de 2 meses após a aplicação, podendo ter efeito residual importante no crescimento da planta após 2 anos da aplicação (Whitehead, 2000). Assim, diferentemente da agricultura, a eficiência da adubação na pecuária é medida não apenas pela produção vegetal (grãos; biomassa), mas também pela capacidade de produção de carne por unidade de nutriente aplicado. Assim, na pecuária, a avaliação da eficiência da adubação torna-se mais complexa, por conter o fator animal.

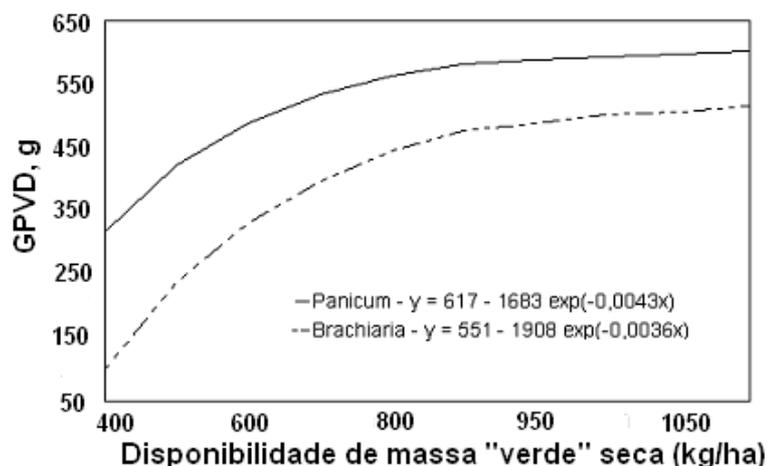


Figura 7. Ganhos de peso vivo diários (GPVD) em função da disponibilidade de matéria verde seca (kg ha^{-1}).

Para viabilizar a pecuária, o uso da adubação é necessária e, para isso, existem diversas estratégias, como emprego da integração agricultura-pecuária com melhor relação custo/benefício comparado a forma convencional, como a reforma e a renovação das pastagens. A adoção de tecnologias simples na propriedade, como emprego da adubação em parte da área, cerca de 25% com uso de uma forrageira responsiva, como capim-elefante, permite duplicar a produção de carne por unidade de área comparada à obtida em pastagens exclusivas de braquiária.

Independentemente da estratégia ou do sistema de produção a ser adotado, a eficiência bioeconômica da adubação na produção animal depende da eficiência agrônômica (kg de matéria seca/kg de nutriente aplicado), da eficiência de pastejo, a relação da forragem produzida que é consumida pelo animal, dada em porcentagem; e a eficiência de conversão alimentar, ou seja, a eficiência do animal em converter em carne a forragem consumida (kg matéria seca de forragem/kg ganho de peso vivo). Assim, os resultados das três eficiências indicam a eficiência do nutriente aplicado como fertilizante, em produto animal. Desse modo, observa-se que apenas eficiência agrônômica, ou seja, a maior oferta de forragem não garante maior retorno da atividade pecuária. Assim, é importante considerar todo o processo pós-produção da forragem até a conversão em carne. E para a maximização das três eficiências, diversos fatores devem ser considerados, tendo um peso importante os aspectos ligados à nutrição de plantas.

2.2 Aspectos nutricionais das forrageiras cultivadas no Brasil

No Brasil Central, os bovinos engordados a pasto apresentam melhor desempenho na estação das chuvas (ganhos de peso médio de 500 g por dia) e fraco desempenho na época das secas, quando mantêm o peso ou perdem peso (Thiago & Costa, 1994). Assim, o desempenho médio anual do rebanho é relativamente baixo, tendo em vista as deficiências na oferta de forragem de qualidade ao animal ao longo do ano. Desse modo, a situação atual das pastagens no Brasil é preocupante, há várias décadas, devido ao alto grau de degradação que afeta a oferta de forragem e o retorno econômico da atividade, além de problemas ambientais.

Perón & Evangelista (2004), em uma revisão de literatura, estimaram que 80% dos 50 a 60 milhões de hectares de pastagens cultivadas no Brasil Central encontram-se em algum estado de degradação, ou seja, em processo evolutivo de perda de vigor, sem possibilidade de recuperação natural e incapazes de sustentar os níveis de produção e qualidade exigidos pelos animais. Os autores complementam que essa degradação é consequência de vários fatores que atuam isoladamente ou em conjunto, como preparo incorreto do solo, escolha errada da espécie forrageira, uso de sementes de baixa qualidade, má formação inicial, manejo inadequado e, principalmente, em razão da não-reposição dos nutrientes perdidos no processo produtivo, por exportação no corpo dos animais, erosão, lixiviação e volatilização ao longo dos anos. Spain et al. (1975) complementam que a associação da baixa fertilidade do solo com o estresse hídrico agrava o problema com baixo crescimento das forrageiras. Moreira et al. (2007) acrescentam que, na época seca do ano, o cultivo de forrageiras, como aveia-preta e triticale, é uma alternativa viável devido a sua produtividade e composição química.

Palieraqui et al. (2006) observaram que irrigação afeta a produção das forrageiras, tendo incremento de 26 até 69% da massa seca de folhas, para capins napier e mombaça, respectivamente; entretanto, não afetou o teor de proteína, tendo em vista o nível de adubação utilizada, especialmente nitrogênio. Dantas Neto (2000) também observou que a aplicação de água aumentou o rendimento de matéria seca do capim-buffel, mas não influenciou no teor de proteína bruta.

Nascimento Jr. et al. (1994) acrescentam que o superpastejo é uma das principais causas da degradação, pois em virtude do grande número de animais, tem-se redução do vigor das plantas, sua capacidade de rebrotação e produção de sementes. Isso ocorre porque os animais pastam colhendo a forragem cada vez mais próximo do solo, reduzindo a quantidade de material vegetal que cai no solo e que passaria a constituir uma importante fonte de nutrientes que seriam reaproveitados pelas plantas forrageiras através da reciclagem. Assim, Aguiar (1998) recomenda resíduo pós-pastejo com cerca de 25% de folhas verdes para restabelecer com maior velocidade a taxa de fotossíntese. E este resíduo pós-pastejo, comumente associado com maior rebrotação da pastagem, varia de 1500 a 2500 kg matéria seca ha⁻¹, que, na prática pode ser estimado pela altura de dossel do resíduo. A altura de resíduo varia com a forrageira, sendo de 5 a 10 cm (*Dictyneura*; estrelas; Tiftons; Coastcross; Humidícula; Pangola); 10 cm (*B. decumbens*); 10 a 15 cm (*Andropogon*; *B. brizantha*; Jaraguá; *B. Ruziziensis*; Setária); 20 cm (Colonião; Tobiata; Tanzânia; Mombaça) e 40 a 50 cm (Napier e Cameron).

Além dos problemas de manejo, a fertilidade do solo é um fator importante na longevidade das pastagens e pode afetar a degradação. Neste sentido, Freitas et al. (2000) observaram em pastagem degradada a baixa fertilidade do solo em relação à pastagem não-degradada, especialmente pela maior acidez e menor saturação por bases (Ca, Mg e K) e também de S e P. Além disso, a taxa de mineralização da matéria orgânica reduz o estoque de nitrogênio com tempo de uso da pastagem, implicando o agravamento do nível de degradação, especialmente com aumento da taxa de lotação. Neste sentido, Bouman et al. (1999) verificaram que a mineralização da matéria orgânica, de 40-60 e 65 kg N ha⁻¹ ano⁻¹, esteve associada a taxas

de lotação de 1,5-2,0 e 2,2-2,5 UA ha⁻¹ ano⁻¹, atingindo até 94 kg N ha⁻¹ ano⁻¹, com pastagem suportando produtividade animal de até 330 kg PV ha⁻¹ ano⁻¹.

Neste contexto, a baixa fertilidade do solo implicaria a necessidade de fornecimento de nutrientes, via fertilizantes, para suprir adequadamente a exigência nutricional das forrageiras. Entretanto, muitas vezes, a aplicação dos fertilizantes pode não estar satisfazendo as exigências nutricionais das plantas forrageiras, e, conseqüentemente, a produção pode ser limitada, agravando-se a degradação das pastagens. Este fato pode ser verificado quando se compara a exigência nutricional de algumas culturas, com o consumo médio de fertilizantes utilizados nas respectivas culturas (Tabela 4).

Tabela 4. Exigência nutricional e consumo aparente de fertilizantes (N+P₂O₅+K₂O) de algumas culturas

Cultura	Exigência nutricional total ⁴		Consumo de fertilizantes ²
	N+P+K	N+P ₂ O ₅ +K ₂ O ¹	N+P ₂ O ₅ +K ₂ O
Soja ³ (2,8 t ha ⁻¹)	90(54)+7+38	152 (97)	145
Cana-de-açúcar (73,0 t ha ⁻¹)	73+9,7+76	186	206
Milho (3,7 t ha ⁻¹)	176+32+149	430	110
Pastagens ⁵	59,4+14,6+145,9	269	<5

Obs. ¹ Px2,29136 = P₂O₅; Kx1,20458 = K₂O; ² ANDA (1999); ³ Na soja, estima-se que 60% da exigência em N provém da fixação biológica, e o restante do solo (54 kg ha⁻¹ de N); ⁴ A necessidade de adubação é maior que a exigência nutricional, pois existem perdas dos nutrientes no solo, que em média para N, P e K é de 50, 70 e 30%, respectivamente. ⁵ *B.brizantha*, é cultivada em solo sob o manejo pelo sistema "barreirão" (Magalhães et al., 2002).

No Brasil, especificamente em pastagens, praticamente não são utilizados fertilizantes próximo a 3,6 kg ha⁻¹ (Anuário Estatístico do Setor de Fertilizantes, 2002). E ainda, em áreas localizadas que promovem renovação da pastagem com uso de fertilizantes, os mesmos são utilizados apenas no estabelecimento, e a médio prazo têm novamente a sua degradação. Portanto, a aplicação contínua dos fertilizantes é importante na produção da forrageira, comparada à aplicação descontínua (Martinello & Berardo, 2007). A amplitude da resposta da forrageira à adubação pode variar em função da fertilidade do solo. Primavesi et al. (2008) observaram em pastagem de *Paspalum regnellii*, no segundo ano, que ocorrem respostas para nitrogênio e fósforo no solo com fertilidade baixa e para nitrogênio no solo com fertilidade média em fósforo e potássio.

Salienta-se que, além dos fertilizantes, existem outras fontes de nutrientes, como a escória de siderurgia (Ca, Mg, micronutrientes) (Prado & Fernandes, 2000a; Prado et al., 2002a,b), silicatos de cálcio (Ca) (Prado & Natale, 2005), cinzas de biomassa de espécies florestais (Prado et al., 2002c), entre outras, o que não foi considerado na Tabela 4.

Ressalta-se que a exigência das culturas foi obtida para nível de produtividade próxima da média nacional. Por esses resultados médios, pode-se inferir que pode estar ocorrendo um esgotamento de nutrientes de solos, já de baixa fertilidade. Este quadro de subdose de fertilizantes em plantas tipicamente do grupo das forrageiras é uma realidade a nível nacional e internacional, com raras exceções, como algumas regiões do oeste Europeu e Austrália, e Nova Zelândia.

Assim, o uso de forrageiras cultivadas em solos de baixa fertilidade e também sem a devida adubação não deve atender às exigências nutricionais das forrageiras, com reflexos no desempenho animal.

Neste sentido, Sarmiento et al. (2006) avaliaram o potencial do Argissolo Vermelho-Amarelo em suprir nutrientes para o capim-tifton 85 e relacionar a concentração de nutrientes na parte aérea da planta

com o aparecimento dos sintomas de deficiência. Os tratamentos avaliados foram: testemunha (sem calagem e sem adubação), completo (calagem com CaCO_3 e adubação com N, P, K, Mg, S, B, Cu, Mo e Zn) e completo com omissão de um nutriente por vez (completo -N, -P, -K, -Ca, -Mg, -S, -Cu e -Zn). A aplicação dos tratamentos resultou no aparecimento de sintomas de deficiência de N, K, S e Mg e em teores foliares de N, P, K, Mg e S abaixo da faixa tida como adequada para o capim-tifton. A omissão de Ca, Mg, Cu e Zn não afetou a produção de matéria seca, mas, nos tratamentos -N, -P, -K e -S houve redução de 57; 31; 25 e 31%, respectivamente. Concluíram que o Argissolo não supriu as exigências do capim-tifton 85 em N, P, K, Mg e S. As baixas concentrações de N, K, Mg e S nas plantas foram relacionadas com o aparecimento dos respectivos sintomas de deficiência.

Assim, as plantas forrageiras com teor baixo do nutriente e/ou com deficiência não permitem as concentrações mínimas requeridas para produção animal. Por exemplo, a exigência de um novilho de 350 kg e ganho diário de peso de 0,5 kg iria requerer uma forragem com a seguinte composição química : N = 11,2; P = 0,5; K = 6,0; Ca = 1,2; Mg = 1,0 e S = 1,5 g kg^{-1} de matéria seca; Cu = 10 e Zn = 30 mg kg^{-1} de matéria seca (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1996).

Assim, alguns desbalanços de nutrientes no solo refletiriam na forrageira e no animal. Alguns exemplos são: a "tetania dos pastos", uma deficiência de Mg induzida por excesso de K ou de Ca; o excesso de Mo pode causar deficiência de Cu (diarréia das pastagens); o excesso de S que pode induzir à carência de Se (Schunke, 2001). Prada et al. (1998), analisando forrageiras do Estado de Mato Grosso do Sul, observaram que o teor de Cu dos capins foi considerado normal para a nutrição de bovinos em pastejo, entretanto os teores de Mo estavam excessivos.

Neste contexto, desequilíbrios minerais em bovinos criados em campo são descritos em quase todas as regiões do mundo. Deficiências de minerais são comuns em bovinos em pastejo no Brasil (Tokarnia et al., 2000). Senger et al. (1996) observaram que 98% do total de amostras de pastagem do Rio Grande do Sul não atingiram o teor mínimo de fósforo (1,8 g kg^{-1}), para atender ao requerimento mínimo de bovinos. França (1984) revisou trabalhos sobre os micronutrientes e relata que a maioria das pastagens de gramíneas tropicais analisadas no Brasil mostrou deficiência de cobalto, de cobre e de zinco para nutrição de bovinos. Já os teores de manganês, de ferro e de molibdênio foram adequados. Como a taxa de utilização de nutrientes em áreas tropicais sob pastejo de ruminantes é usualmente da ordem de 10% a 40% (Thomas, 1992), se a forragem estiver com níveis baixos de nutrientes, haverá reflexos nos animais. Assim, Malavolta et al. (1986) observaram em vários estados brasileiros, carência de Co, Cu e Zn tanto em forrageiras como no tecido dos animais.

As deficiências minerais podem ocorrer sob diversos graus, desde deficiências severas, com perturbação mais ou menos características, até deficiências leves, com sintomas não-específicos, como desenvolvimento lento, problemas de fertilidade, baixo rendimento da carcaça e pouca produção de leite. Os minerais desempenham três tipos de funções essenciais para o organismo dos animais e do homem. A primeira delas diz respeito a sua participação como componentes estruturais dos tecidos corporais (por exemplo Ca, P). Também atuam nos tecidos e fluidos corporais como eletrólitos para a manutenção do

equilíbrio ácido-base, da pressão osmótica e da permeabilidade das membranas celulares (Ca, P, Na, Cl). Por último, funcionam como ativadores de processos enzimáticos (Cu, Mn) ou como integrantes da estrutura de metalo-enzimas (Zn, Mn) ou vitaminas: (Co), Ca, P, Mg, K, Na, Cl, S, Fe, Co, Cu, I, Mn, Zn e Se. Ultimamente, têm-se acrescentado mais alguns minerais da lista supramencionada, como o flúor, molibdênio, cromo, níquel, vanádio e silício.

Os elementos minerais deficientes para ruminantes em condição exclusiva de pastejo são fósforo, sódio, cobre, cobalto, zinco, iodo e selênio. Em algumas regiões, cálcio, magnésio, potássio, manganês e, eventualmente, ferro podem também estar deficientes. Molibdênio e enxofre, em solos de melhor fertilidade, induzem a deficiência de Cu. O F, Se, Fe e Mn, em excesso, causam intoxicação.

Os desequilíbrios minerais são responsáveis por baixa produção de carne, leite, problemas reprodutivos, crescimento retardado, abortos, fraturas e queda da resistência orgânica. Tanto a deficiência severa, acompanhada por taxas de elevada mortalidade, como as deficiências subclínicas, cujos sintomas não são perceptíveis clinicamente, podem levar a perdas consideráveis na produtividade.

Um mineral pode ser considerado essencial quando sua ausência na dieta ocasiona redução no desempenho e/ou saúde dos animais. Existe uma condição ótima de concentração e forma funcional para cada elemento no organismo, a fim de manter sua integridade estrutural e funcional, de maneira que a saúde, crescimento e reprodução se mantenham inalterados. As funções biológicas ocorrem dentro de uma concentração ótima nos tecidos, mantida pelos mecanismos homeostáticos. A consequência inicial da deficiência de um nutriente na dieta é tornar esse balanço mais difícil de ser mantido. Concentrações subótimas provocam lesões bioquímicas, que resultam em prejuízo às funções fisiológicas. O apetite em geral é afetado, e o desempenho animal cai. Sintomas clínicos podem auxiliar o diagnóstico, mas a deficiência pode já estar bastante avançada quando são percebidos; ou os sintomas podem ser inespecíficos ou, ainda, podem ser complicados por deficiências múltiplas (Little, 1981).

Normalmente, existe uma curva de resposta biológica à oferta do elemento na dieta (Figura 8). A faixa de concentração de ação fisiológica adequada (faixa de segurança) é o plateau onde a ingestão do nutriente permite uma resposta ótima; níveis abaixo ou acima dessa faixa resultam em prejuízo consistente e reproduzível do equilíbrio fisiológico e, por conseguinte, do desempenho e/ou saúde.

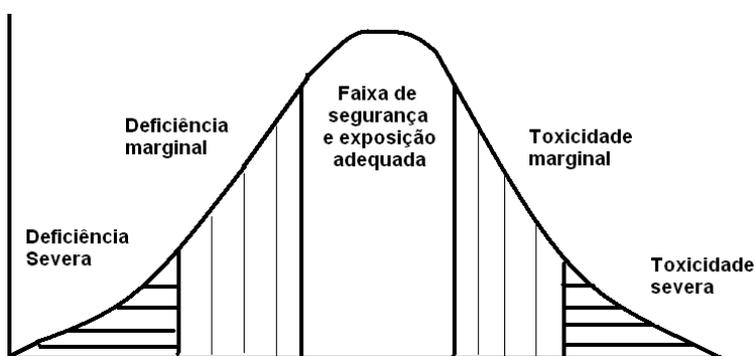


Figura 8. Resposta biológica à oferta de elementos minerais na dieta animal.

Por fim, um sistema de produção para ser eficiente, tanto do ponto de vista biológico como econômico, deverá considerar as interações ou interfaces entre as diversas tecnologias aplicadas, como a adubação das forrageiras e a suplementação animal (Schunke, 2001).

2.3 Importância da eficiência agrônômica para produção de forrageiras e da eficiência de pastejo

Os resultados das três eficiências, a agrônômica, a pastejo e a conversão alimentar, explicam a eficiência da adubação em converter nutriente aplicado em produto animal. Na presente ocasião, serão abordadas a eficiência agrônômica, que indica a produção de forragem por nutriente aplicado e também a eficiência de pastejo, que indica o aproveitamento da forrageira consumida pelo animal, tendo como ênfase os fatores ligados à nutrição de plantas que poderia influenciar nas referidas eficiências.

É conhecida a necessidade da aplicação de nutrientes em pastagens tropicais, os custos elevados dos fertilizantes e o baixo preço do produto animal; portanto, é importante conhecer os fatores de produção mais importantes, que garantam maior eficiência do sistema de produção.

Dentre as etapas da produção animal, as principais eficiências seriam a da produção da forrageira e a da eficiência de pastejo, pois as mesmas teriam maior controle do produtor e, conseqüentemente, maior influência no retorno econômico da atividade. Neste sentido, é importante o uso de sistemas de produção com eficiência moderada e preferencialmente elavada, pois seria menos dependente dos riscos de preços do fertilizante e do produto animal. Como o produtor não tem efetivo controle sobre preços de insumos e da arroba de carne, a garantia de maior retorno econômico com menor risco seria o uso de sistemas de eficiência elevada, pois o ponto de nivelamento é superior a 1, exceto um caso: quando o insumo atingiu maior valor e a arroba de carne o menor valor (Tabela 5) (Martha Júnior et al., 2004a).