

JUAREZ BARBOSA TOMÉ JUNIOR

UMA NOVA ABORDAGEM NAS RECOMENDAÇÕES DE ADUBAÇÃO

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do Título de "*Doctor Scientiae*".

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2004

JUAREZ BARBOSA TOMÉ JUNIOR

UMA NOVA ABORDAGEM NAS RECOMENDAÇÕES DE ADUBAÇÃO

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do Título de "*Doctor Scientiae*".

APROVADA EM: 21 de janeiro de 2004.

Júlio César Lima Neves
(Conselheiro)

Víctor Hugo Alvarez V.
(Conselheiro)

Thomas Jot Smyth

Hermínia Emília Prieto Martinez

Roberto Ferreira de Novais
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

O autor gostaria de deixar registrado seu agradecimento a todos os profissionais participantes do esforço de desenvolvimento do sistema FERTICALC, cujos trabalhos estão citados no texto. A contribuição desses profissionais, através de discussões e colaborações técnicas, ajudaram a elucidar muitos aspectos relacionados a cada cultura com a qual trabalharam.

Agradecimento especial também deve ser feito aos professores do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, especialmente àqueles mais intimamente envolvidos nesse projeto, como o Prof. Júlio César Lima Neves, Reinaldo B. Cantarutti e Vitor H. Alvarez, cujos conselhos e ensinamentos muito contribuíram para a elaboração e aprimoramento desse trabalho.

Agradecimento especial esse que se estende também ao Prof. Roberto Ferreira de Novais, mas para o qual, o autor deseja externar mais do que um simples agradecimento. O Prof. Novais contribuiu muito mais do que apenas com conhecimentos e conselhos técnicos, pois além de sua capacidade profissional, que é reconhecida mundialmente, sua postura como pessoa humana e a vibração demonstrada no exercício do magistério, exemplificam o verdadeiro significado desse autêntico sacerdócio. Além disso, a confiança que demonstrou em minha capacidade, dando-me grande liberdade para exercitar a criatividade na elaboração desse trabalho, foram profundamente tocantes.

Enfim, agradeço também a todos os funcionários e colegas estudantes do Departamento de Solos que colaboram para manter acesa a chama da pesquisa agrônômica em meio a tantas dificuldades.

BIOGRAFIA

Juarez Barbosa Tomé Junior é Engenheiro Agrônomo formado pela Universidade Federal de Viçosa em julho de 1984. Iniciou sua carreira profissional trabalhando como assistente técnico na extinta Cooperativa Agrícola de Cotia em Bandeirantes-PR. Posteriormente, no ano de 1987, iniciou suas atividades como docente na Fundação Faculdade de Agronomia “Luiz Meneghel”, também em Bandeirantes-PR, lecionando, em diferentes períodos, as disciplinas de Olericultura, Fertilidade do solo, Nutrição Mineral de Plantas e Adubos e Adubação, tendo sido também responsável técnico pelo laboratório de Fertilidade do Solo dessa Instituição. Concluiu o Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), em Piracicaba-SP, no ano de 1992. Além de seu trabalho como docente, exerceu o cargo de coordenador da Comissão Estadual de Laboratórios de Análises Agrônomicas do Paraná (CELA-PR), associação científica que reúne os laboratórios desse Estado, visando incrementar o uso da análise de solo pelos produtores e profissionais da área e melhorar a qualidade dos serviços prestados pelos laboratórios, coordenando o programa de controle de qualidade laboratorial. Durante esse período atuou também como consultor na montagem de vários laboratórios de análise de solo em diversas regiões brasileiras. É autor do livro “Manual para Interpretação de Análises de Solos”, publicado em 1997 e desenvolveu aplicativos de computador com a finalidade de facilitar o trabalho dos profissionais de Agronomia na interpretação de análises de solo e de tecidos vegetais e realização de recomendações de adubação. Atualmente, trabalha como pesquisador na Embrapa, na sede da Empresa em Brasília, colaborando na gestão da pesquisa agrônômica nessa Instituição.

CONTEÚDO

RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
1. Introdução	1
2. Objetivo geral.....	3
2.1. Objetivos específicos.....	3
3. Situação atual dos métodos para efetuar recomendações de adubação	5
3.1. Abordagem clássica (construção de tabelas)	5
3.1.1 Ajuste dos resultados experimentais a modelos matemáticos	6
3.1.2 Construção de tabelas com sugestões de adubação	9
3.1.3 Melhor aproveitamento das informações de experimentos de adubação	13
3.2. Alternativas à utilização de tabelas	16
3.2.1 Curva de resposta estimada	17
3.2.1.1. Método de Raij & Cantarella (1996)	18
3.2.1.2. Método de Johnson (1991).....	24
3.2.2 Sistema 'QUEFTS' ('Quantitative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils')	37
3.2.3 Sistema NuMaSS ('Nutrient Management Support System')	43
3.3. Sistema 'FERTICALC'	49
3.3.1 Proposta original de Novais & Smyth (1999)	52
3.3.1.1. Cálculo da demanda de P pela cultura.....	52
3.3.1.2. Fornecimento de P pelo solo	56
3.3.2 Características do Sistema FERTICALC proposto para diferentes culturas	57
3.3.2.1. Demanda de nutrientes	58
3.3.2.2. Fornecimento de nutrientes pelo solo	64
3.3.2.3. Sustentabilidade	66
4. Descrição do Sistema Genérico proposto	73
4.1. Cálculo da demanda de nutrientes.....	74
4.1.1 Agrupamento das culturas	74
4.1.2 Definição de componentes estruturais para maior detalhamento do cálculo da demanda de nutrientes.....	75
4.1.3 Estimativa da matéria seca dos componentes pela produtividade comercial	85
4.1.4 Planilha para pesquisa de informações para o cálculo da demanda nutricional.....	87
4.1.5 Correção dos teores de P e S dos componentes pela FCP do solo	92
4.1.6 Cálculo da demanda de nutrientes	93
4.1.7 Cálculo da quantidade de nutrientes requerida no solo	95
4.2. Cálculo do suprimento de nutrientes.....	96
4.2.1 Suprimento de N pelo solo.....	96
4.2.2 Suprimento de P, K e S pelo solo	100
4.2.3 Ca, Mg e calagem	106
4.2.4 Recomendações de plantio para culturas perenes.....	107

4.2.5 Suprimento de nutrientes pela adição de adubos orgânicos e,ou restos de culturas anteriores	108
4.3. Cálculo da dose de nutriente a aplicar	109
5. Considerações sobre a validação do sistema	111
5.1. Introdução.....	111
5.2. Exemplo de cálculo com a cultura da soja.....	113
5.3. Correção dos teores de P e S dos componentes	114
5.4. Cálculo da demanda de nutrientes.....	115
5.5. Quantidade de nutrientes requerida no solo	116
5.6. Suprimento de N pelo solo	116
5.7. Suprimento de P, K e S	117
5.8. Quantidades a aplicar de P, K e S	119
6. Resumo das etapas dos cálculos para aplicação do sistema.....	122
7. Resumo e Conclusões	126
8. Referências bibliográficas.....	127

RESUMO

TOME JUNIOR, Juarez Barbosa, D.S. Universidade Federal de Viçosa, janeiro de 2004. **Uma nova abordagem nas recomendações de adubação.** Orientador: Roberto Ferreira de Novais. Conselheiros: Júlio César Lima Neves e Víctor Hugo Alvarez V.

O objetivo deste trabalho é propor uma nova abordagem para realização de recomendações de adubação de culturas agrícolas, em substituição à abordagem tradicional, de utilização de tabelas que relacionam a classificação de resultados de análises de solo com doses de nutrientes a aplicar. Propõe-se um sistema de cálculos que estima a demanda da cultura por nutrientes, baseando-se na produtividade almejada e no conteúdo de nutrientes nos diferentes componentes da planta, além de usar os resultados de análises de solo de rotina como 'índices de suficiência', pelos quais se estima o suprimento potencial de nutrientes pelo solo. As doses de nutrientes a aplicar como fertilizantes correspondem à diferença entre a demanda e o suprimento, além de considerar outras fontes de nutrientes, como restos da cultura anterior e adubos orgânicos. Dessa forma, é possível estimar o balanço de massa dos nutrientes no sistema agrícola e monitorar a sustentabilidade da exploração em termos de manutenção da fertilidade do solo em longo prazo. O sistema foi idealizado com características que favorecem o desenvolvimento de um aplicativo de computador para utilização pelos profissionais da área, ser suficientemente flexível para permitir seu constante aprimoramento e ser adaptável a qualquer tipo de cultura e regiões agrícolas. Desta forma, o sistema deverá ser testado pelo uso, verificando-se a sua validade como ferramenta de modelagem para que o profissional possa aplicar e monitorar os resultados de suas recomendações em médio e longo prazo.

ABSTRACT

TOME JUNIOR, Juarez Barbosa, D.S. Universidade Federal de Viçosa, January of 2004. **A new approach in fertilizers recommendations.** Advisor: Roberto Ferreira de Novais. Committee Members: Júlio César Lima Neves and Víctor Hugo Alvarez V.

The objective of this work is to propose a new approach for carrying out recommendations of crop fertilization, as a substitution for the traditional approach, using tables relating the classification of soil analysis results with the nutrient doses to be applied. A calculation system estimating nutrient crop demand is proposed, based on the productivity goal and nutrient content in the different plant components, besides using the results of routine soil analyses as “sufficiency indexes” through which the potential nutrient supply by the soil is estimated. Nutrient doses to be applied as fertilizers correspond to the differences between demand and supply, besides considering other sources of nutrients, such as previous crop residues and organic fertilizers. Thus, it is possible to estimate the nutrient mass balance in the cropping system and monitor the sustainability of the exploration in terms of long-term soil fertility maintenance. The system was designed with features that favor the development of a computer program to be used by agronomy professionals and be sufficiently flexible to be constantly improved and adapted to any type of crop and to all farming regions. The proposed system must be tested to verify its validity as a modeling tool, by enable the user to monitor the short- and long-term results of its recommendations.

1. Introdução

A utilização racional de insumos na produção agrícola é impositiva num cenário de custos crescentes e redução nos preços dos produtos agrícolas, principalmente numa perspectiva em que os produtos agrícolas brasileiros deverão competir num mercado globalizado, onde estarão presentes sistemas produtivos de elevada eficiência e, ou, de custos com elevada carga de subsídios. Além disso, há uma crescente conscientização da necessidade de se utilizarem técnicas ambientalmente corretas, cuja atenção deve estar sempre voltada para a saúde do consumidor e obtenção da sustentabilidade da exploração agrícola.

Nesse contexto, a determinação adequada das doses de fertilizantes torna-se passo muito sensível no manejo da fertilidade do solo, pois os cálculos deverão sempre levar em consideração não só o aspecto econômico imediato, mas também a preservação da capacidade produtiva do solo ao longo dos anos. Para indicar tais doses racionalmente calculadas, dentro dos aspectos citados, devem ser consideradas todas as variáveis conhecidas, para as condições tecnológicas atuais, suplementando, assim, as decisões com critérios técnicos que reduzam as margens de erro.

Atualmente, os instrumentos disponíveis para os profissionais da área agrônoma indicarem doses de nutrientes para as culturas são a análise química do solo e tabelas que relacionam os resultados dessa análise com as doses recomendáveis. A análise química de amostras de solo é, de fato, uma ferramenta importante nas decisões concernentes ao manejo da fertilidade do solo. Os resultados de teores “extraíveis” de nutrientes, bem como de outras características do solo, permitem uma previsão razoavelmente acurada do comportamento da cultura a ser instalada. Estudos que se iniciaram, tanto no Brasil quanto no exterior, nas décadas de 60 e 70 (Raij, 1983), permitiram a consolidação de ampla gama de informações oriundas de experimentos de campo, uniformizando as interpretações e recomendações dos diversos profissionais da cadeia técnico-científica. Como conseqüência, houve, na opinião de Novais & Alvarez (2000), grande evolução agrônoma, pois a consulta às tabelas leva às mesmas recomendações, certas ou não.

Não obstante, tal sistema de recomendações, baseado em tabelas, tem sido criticado por não favorecer a evolução, já que não permite a fácil incorporação de

novos conhecimentos, e por ser pouco flexível, não permitindo adaptações localmente específicas.

Isso ocorre porque a opção foi disponibilizar para os extensionistas e produtores rurais resultados experimentais consolidados na forma de tabelas genéricas, representando uma média regional. Essa opção se justificou pela facilidade de uso das tabelas, principalmente considerando-se que na época em que foram desenvolvidas, o acesso à informática praticamente inexistia. No entanto, na forma como foram idealizadas, as tabelas não permitem aos profissionais a possibilidade de realizar simulações e adaptações, pois eles não têm acesso aos modelos matemáticos utilizados pelos pesquisadores para estudar a resposta das culturas aos fertilizantes, ou seja, as equações que permitem análises técnico-econômicas.

O cenário atual, porém, é bem diferente. Houve grande avanço no acesso aos recursos da informática, o que difundiu, entre os profissionais, a cultura da modelagem e simulação de cenários alternativos, criando uma forte demanda por sistemas informatizados, mas os métodos de recomendação de adubação não acompanharam essa mudança. As tabelas são ainda largamente utilizadas por extensionistas em quase todas as regiões agrícolas do mundo, apesar de suas limitações.

Um novo enfoque para as recomendações de adubação torna-se, portanto, necessário. Nesse sentido, Novais & Smyth (1999), considerando as tabelas excessivamente empíricas, sugerem sua substituição por sistemas de cálculos que possuam maior base científica, permitindo uma aplicação mais abrangente, sem restrições regionalistas artificiais, e que sejam abertos a crescente aperfeiçoamento devido à lógica de sua constituição.

Esse enfoque foi adotado para algumas culturas, em trabalhos de pós-graduação do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, os quais indicaram que são possíveis generalizações que permitem a construção de um sistema genérico, sendo esse o assunto do presente trabalho.

2. Objetivo geral

Delinear um sistema de cálculo para recomendações de doses de nutrientes, com as características seguintes:

a) ser aplicável aos diversos tipos de culturas agrícolas, considerando as particularidades de cada uma em termos de componentes estruturais a serem considerados no cálculo da demanda de nutrientes;

b) ser baseado em um balanço entre a demanda nutricional das culturas, de acordo com uma meta de produtividade, e o suprimento de nutrientes pelo solo, considerando ainda a manutenção da fertilidade do solo em longo prazo (sustentabilidade);

c) ter uma estrutura flexível que permita, com facilidade, adaptações nas premissas, componentes e variáveis dos cálculos, visando à obtenção de recomendações localmente específicas e a contribuição para a constante evolução do sistema.

2.1. Objetivos específicos

a) desenvolver um sistema de cálculos genérico a partir das proposições feitas nos estudos já realizados, no Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, para algumas culturas [milho (Carvalho, 2000), arroz (Raffaeli, 2000), tomate (Mello, 2000), café (Prezotti et al., 2000 e Prezotti, 2001), cana-de-açúcar (Freire, 2001), soja (Santos, 2002), banana (Oliveira, 2002) e coco (Rosa, 2002)]. O estudo das soluções adotadas nesses trabalhos torna-se necessário para verificar a possibilidade de seu aproveitamento para composição de um sistema de cálculos unificado e genérico. Objetiva-se, com isso, à criação de uma ‘moldura conceitual’¹ que seja adotada para cada grupo de culturas (anuais, olerícolas, perenes, etc.). Uma moldura específica para cada grupo facilitará a futura inclusão, por critérios de

¹ Prefere-se a utilização das palavras ‘moldura conceitual’ em substituição a ‘modelo’ para não confundir os sistemas de cálculos desenvolvidos (FERTICALC) com os modelos mecanísticos de crescimento de culturas, os quais embora incorporem mecanismos de aquisição de nutrientes pelas plantas, não objetivam estabelecer recomendações de adubação.

semelhança, de culturas eventualmente não contempladas no sistema, pois bastará substituir os parâmetros² de cálculos para atender às especificidades da nova cultura;

b) propor uma moldura de cálculos que seja passível de informatização, com vistas ao desenvolvimento de um aplicativo ("software");

c) especificar as necessidades de informações para especificar os parâmetros do sistema de cálculos para cada cultura, demonstrando claramente quais informações deverão ser pesquisadas;

d) definir as etapas dos cálculos que são oportunidades de modelagem no sistema, demonstrando onde e como o usuário pode atuar de forma a especificar os cálculos para a cultura e região agrícola desejadas.

O sistema de cálculos será delineado de modo a ser aberto a aperfeiçoamentos segundo uma base lógica e ter caráter colaborativo, não só interdisciplinar, mas também interinstitucional. Para isso, o sistema deve tornar explícitas as variáveis técnicas e do ambiente que interferem no resultado final e fornecer valores padrões para elas, mas também permitir ao usuário alteração desses valores, visando permitir simulações para a obtenção de recomendações localmente específicas.

² Variável, no sentido matemático, é o símbolo que representa qualquer um dos elementos de um conjunto, ou seja, uma quantidade que pode assumir qualquer um dos valores de um conjunto de valores e parâmetro é uma variável de caráter secundário cuja finalidade é especificar elementos de um conjunto. Em modelagem, o termo 'variável' tem sido utilizado para designar um 'fator de influência'. Por exemplo, "O teor do nutriente no solo é uma variável importante no estudo da resposta das plantas à adubação". Essa influência é expressa por meio de funções ($Y = f(X)$), que relacionam uma grandeza com as suas variáveis. Desse modo, as funções, ou equações, descrevem o 'modo de influência' da variável. Uma equação é definida pela variável, ou variáveis, seus coeficientes e limites de valores da variável ou variáveis. Os coeficientes e limites de valores têm sido chamados, em modelagem, de parâmetros. São, portanto, valores que especificam 'grau de influência' da variável, sem alterar a natureza da influência. Assim:

Variável (fator de influência)	→	Equação (modo de influência)	→	Parâmetro(s) (grau de influência)
-----------------------------------	---	---------------------------------	---	--------------------------------------

Esses são os sentidos adotados para os termos 'variável' e 'parâmetro' no presente trabalho.

3. Situação atual dos métodos para efetuar recomendações de adubação

Nesse item são abordados os principais métodos atualmente utilizados, no Brasil e no mundo, para determinar as doses de fertilizantes para as culturas, visando estudar as vantagens e limitações de cada um.

3.1. Abordagem clássica (construção de tabelas)

Desde os estudos pioneiros do final do século XIX e início do século XX (Liebig, 1855, Blackman, 1905 e Mitscherlich, 1909, citados por Black, 1993), ficou claro que a resposta em produtividade das culturas à adição de um nutriente ao solo podia ser representada matematicamente. Em experimentos de campo, nos quais doses crescentes de nutrientes são aplicadas ao solo, freqüentemente verifica-se que, inicialmente, a produtividade aumenta significativamente, podendo atingir um valor máximo dependendo das doses utilizadas. Em alguns casos, a adição de doses maiores que as necessárias para a produtividade máxima pode levar a redução na produtividade, indicando efeito negativo de doses muito elevadas. A representação gráfica desses fenômenos, considerando os estágios citados, é conhecida como 'curva de resposta'.

Sabe-se que a produtividade das culturas é consequência da interação das plantas com o ambiente. Assim, na produtividade final estão envolvidas variáveis intrínsecas (capacidade genética) e extrínsecas (fatores ambientais). A variação das doses de um ou mais nutrientes apresenta, na maioria dos casos, grande influência na produtividade, mas a planta, na verdade, está respondendo ao ambiente como um todo. No entanto, é impossível medir todas as variáveis ambientais, e a produtividade final como resposta às doses crescentes de nutrientes é a informação mais importante obtida nesses experimentos. Em alguns casos, outras informações úteis são também anotadas, tais como a quantidade de nutrientes absorvidos pela cultura.

Por isso, uma dada curva de resposta da cultura aos nutrientes veiculados por meio de fertilizantes deve ser considerada uma informação pontual e estática. É inadequada, portanto, para generalizações sobre o comportamento das culturas em ambientes e épocas diferentes daquelas onde a informação foi obtida.

Não obstante, a resposta das culturas aos fertilizantes é uma informação crítica para a avaliação da lucratividade da prática da adubação, o que justifica o grande esforço de pesquisa despendido nas últimas décadas, pois mesmo não sendo possível a extrapolação dos resultados de experimentos isolados, a análise do conjunto deles permitiu determinar, pelo menos, limites práticos para as recomendações.

O ajuste dos resultados experimentais a modelos matemáticos permitiu estudos sobre a economicidade da adubação e os resultados desses estudos foi a elaboração das tabelas.

3.1.1 Ajuste dos resultados experimentais a modelos matemáticos

A abordagem feita pelos cientistas de solo desde o começo foi o estudo da resposta das culturas à adição de doses crescentes de nutrientes, realizando ensaios de campo na maior diversidade possível de condições ambientais. Os resultados obtidos são ajustados a modelos matemáticos por meio de regressão polinomial, geralmente. Os modelos mais utilizados³ são o da raiz quadrada ($Y = b_0 + b_1X^{0.5} + b_2X$), de Mitscherlich ($Y = A(1 - 10^{-c(x+b)})$) e o quadrático ($Y = b_0 + b_1X - b_2X^2$), com ênfase para esse último. Uma característica favorável do modelo quadrático é o ajuste quase linear às doses iniciais de nutrientes, demonstrando grande sensibilidade nesta parte da curva e o fato de caracterizar o efeito depressivo para doses excessivas, o que não acontece com os demais modelos citados (Bataglia & Quaggio, 2000).

Com o ajuste dos dados a um modelo matemático, torna-se possível realizar análises econômicas da adubação (Alvarez, 1985). Esses cálculos estão exemplificados na figura 1, onde foram plotados dados fictícios de resposta do milho à adubação fosfatada. No gráfico superior está a curva de resposta e a reta de custo da adubação (para utilizar o mesmo eixo das ordenadas, permitindo a análise econômica, o custo está expresso em termos de quantidade de produto e não em preço). Para a composição da curva de custos foram feitas as suposições de que o custo fixo da adubação é de 200 kg de milho e que a relação de preço entre 1 kg de

³ Nessas equações, 'Y' representa a produtividade, 'X' a dose de nutriente, 'A' é o rendimento máximo possível e 'b₀', 'b₁' e 'b₂' são coeficientes. No caso da equação de Mitscherlich, o coeficiente 'b' representa o suprimento do nutriente pelo solo e o coeficiente 'c' representa a eficiência do fertilizante, ou 'coeficiente de eficácia'.

P_2O_5 e 1 kg de milho é de 5,23. Verifica-se que a maior distância entre a reta de custo e a curva de resposta (distância esta que corresponde ao lucro) ocorre no ponto em que uma paralela à reta de custo tangencia a curva de produção. A dose de P_2O_5 , correspondente à produtividade nesse ponto, é a que traz maior lucratividade (dose mais econômica), embora nem sempre corresponda à dose necessária para a máxima produtividade.

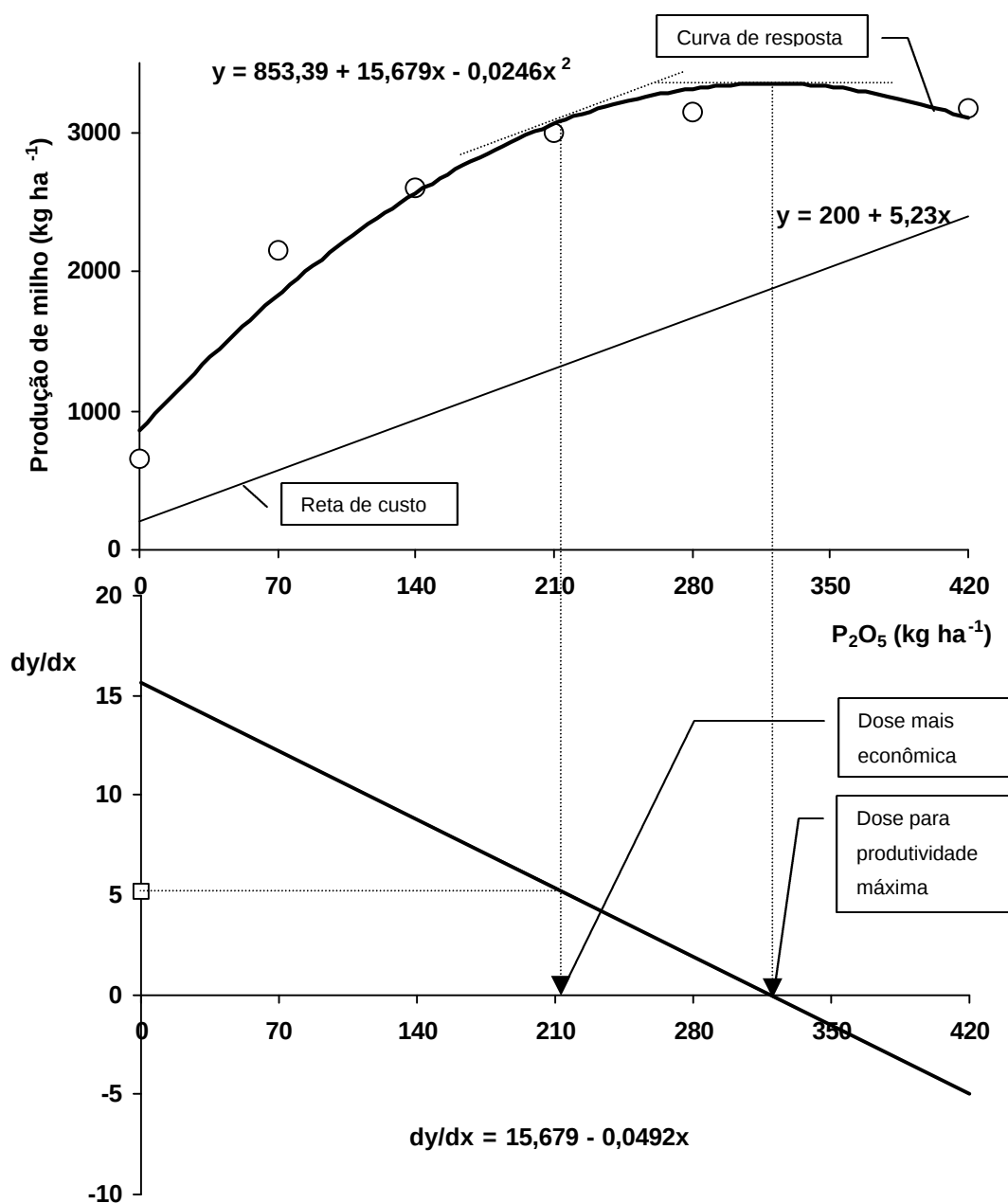


Figura 1. Demonstração gráfica da análise econômica da adubação utilizando curvas de resposta

Black (1993) faz algumas ressalvas à aplicação de modelos matemáticos aos resultados de experimentos de adubação. Segundo esse autor, a influência de fatores ambientais torna a resposta das plantas aos fertilizantes excessivamente complexa para ser descrita adequadamente por modelos matemáticos simples. Tais fatores modificam a forma da curva de resposta e, conseqüentemente, as inferências feitas a partir dela. Como exemplos desses fatores podem ser citados o suprimento pelo nutriente nativo do solo, o efetivo aproveitamento do nutriente adicionado como fertilizante, deficiências de outros nutrientes, disponibilidade de água, ocorrência de toxidez por excesso de outros nutrientes, componentes secundários dos fertilizantes utilizados, densidade populacional das plantas, ocorrência de plantas invasoras, pragas e doenças, condições meteorológicas adversas, época e forma de aplicação do fertilizante, etc.

Assim, o que melhor se pode esperar do ajuste de modelos matemáticos é que eles representem dados experimentais específicos com uma boa aproximação, mas isso está longe do ideal para utilizá-los em previsões.

Ainda segundo Black (1993), existem algumas limitações significativas para a aplicação de representações matemáticas da resposta das plantas aos fertilizantes:

a) todas as equações devem ser classificadas como empíricas, pois o procedimento padrão de ajuste de uma equação aos dados pela minimização da soma de quadrados dos desvios fornece o melhor ajuste para um modelo que é escolhido arbitrariamente;

b) o grau de correspondência à realidade difere entre as equações. Por exemplo, embora não exista dúvida sobre a possibilidade de doses excessivas causarem redução na produtividade, nem todos os modelos matemáticos são capazes de descrever essa possibilidade, como a equação de Mitscherlich na sua primeira aproximação. Não obstante, o grau de ajuste, avaliado pelo coeficiente de determinação (R^2), pode ser semelhante quando vários modelos são ajustados aos mesmos dados, conforme demonstrado por Colwell (1988). Isso, sem dúvida, contribui para reduzir a confiabilidade do modelo selecionado arbitrariamente, qualquer que seja ele. O próprio Black (1993), no entanto, reduz a importância dessa limitação dizendo que tais desvios da realidade são de importância apenas para doses excessivas. De um ponto de vista prático, como os fertilizantes são utilizados para aumentar a produtividade das culturas, a utilização dos modelos se concentra

no lado esquerdo das curvas (doses menores que a necessária para produtividade máxima). Mesmo assim, é válido o alerta feito por Bataglia & Quaggio (2000): a escolha do modelo que melhor representa a curva de resposta não pode ser feita apenas por critérios estatísticos, simplesmente comparando os valores de R^2 , sendo importante considerar os desdobramentos da aplicação desses modelos;

c) com exceção da equação de Mitscherlich (ver nota de rodapé número 3), os coeficientes das equações não têm significado biológico, são meramente matemáticos.

3.1.2 Construção de tabelas com sugestões de adubação

Relacionando os resultados de produtividade com análises do solo das parcelas experimentais é possível estimar índices de suficiência dos nutrientes em cada solo (Figura 2).

Quando são obtidas as curvas de resposta de uma cultura consideradas representativas para um determinado conjunto de condições de solo, clima e técnica de manejo, podem ser construídas tabelas que relacionam os resultados de análises de solo às doses de nutrientes aplicadas. Normalmente, essas tabelas visam sugerir doses para uma grande região agrícola, como um Estado (Quadro 1).

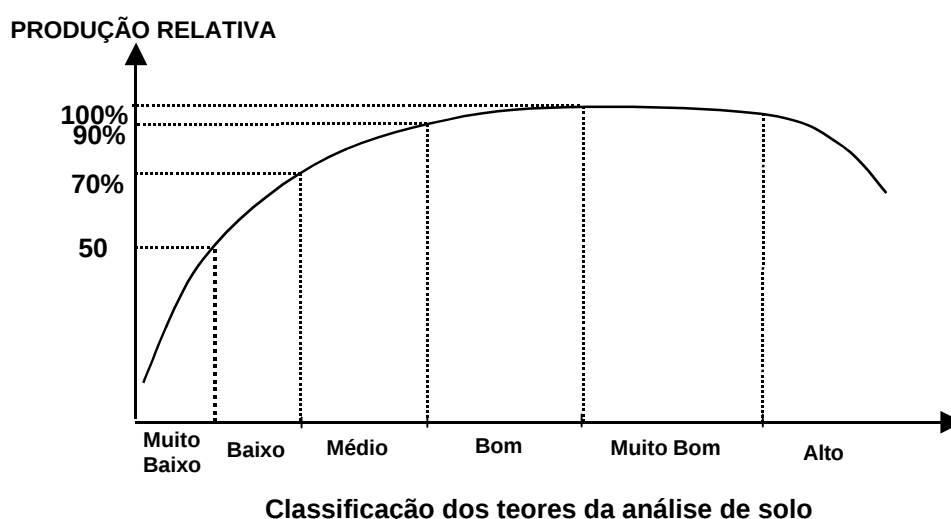


Figura 2. Exemplo hipotético da calibração dos resultados da análise química de solo com base em curvas de resposta. Fonte: elaborado com base nos limites interpretativos adotados por Raij (1996).

Quadro 1. Doses de nutrientes sugeridas para a adubação da cultura do milho em Minas Gerais

Produtividade	Dose de N	Disponibilidade de P			Disponibilidade de K			Dose de N
		Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta	
	Plantio	Dose de P ₂ O ₅			Dose de K ₂ O			Cobertura
	t ha ⁻¹	-----			kg ha ⁻¹	-----		
< 6	10-20	80	60	30	50	40	20	60
6-8	10-20	100	80	50	70	60	40	100
> 8	10-20	120	100	70	90	80	60	140

Fonte: Alves et al., 1999

Essas tabelas são de ampla utilização em todos os países onde se pratica uma agricultura tecnificada, devido à sua facilidade de uso e pode-se dizer que trouxeram valiosa contribuição por padronizarem as recomendações fornecidas pelos extensionistas, evitando erros mais grosseiros (Novais & Alvarez, 2000). No entanto, podem ser questionadas em alguns aspectos:

a) na tabela exemplificada (Quadro 1), embora sejam apresentadas sugestões de doses de nutrientes diferentes conforme a produtividade esperada, isso é feito dentro de faixas de produtividades e não doses específicas para cada produtividade. Isso faz com que uma mesma dose de nutriente seja indicada para diferentes produtividades. Por exemplo, para teores médios de P indica-se a mesma dose de P_2O_5 , de 80 $kg\ ha^{-1}$ para produtividades variando de 6 a 8 $t\ ha^{-1}$. É interessante ressaltar que a consideração da produtividade é recente (no Brasil, as publicações dos órgãos de pesquisa começaram a adotar essa configuração a partir de 1996). Anteriormente, as sugestões eram feitas para uma produtividade média da região, não contemplando a realidade específica de alguns produtores que conseguem maior produtividade. Para esses, seria necessário realizar extrapolações, mas as tabelas não forneciam critérios objetivos para isso. Em outras palavras, embora as tabelas sejam construídas com base em modelos matemáticos que delineiam relações contínuas entre a produtividade e as doses de nutrientes, a sua leitura induz a uma abordagem discreta.

b) as doses de N recomendadas pelas tabelas, em geral, não levam em consideração fatores ambientais que interferem no suprimento desse nutriente pelo solo, tais como o teor de matéria orgânica do solo, a sucessão de culturas com leguminosas fixadoras de N, práticas de manejo, dentre outros;

c) não há indicações para modificações nas doses recomendadas conforme as taxas de aproveitamento dos fertilizantes utilizados. Esse aspecto não pode ser negligenciado por interferir diretamente na resposta das plantas. Por ser fortemente dependente de condições ambientais, de manejo da adubação e do tipo de fertilizante, a consideração desses fatores na estrutura da tabela é muito dificultosa;

d) a classificação da disponibilidade dos nutrientes P e K é feita de acordo com faixas de valores, o que pode causar, em alguns casos, recomendações incoerentes dos pontos de vista econômico e agrônomo. Tomando como exemplo um solo com teor de argila de 50 %, a disponibilidade de P pelo extrator Mehlich seria considerada como 'baixa' para teores entre 4,1 e 8,0 mg dm⁻³ (Alvarez et al., 1999). Embora seja uma variação de 100% nos teores disponíveis, não há variação na dose recomendada de P₂O₅ para essa faixa tão ampla de disponibilidade. No entanto, basta uma variação de 1,0 mg dm⁻³, quando o teor passar para 9,0 mg dm⁻³, por exemplo, para que a dose mude de 100 para 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅, considerando-se a produtividade esperada de 6 a 8 t de grãos ha⁻¹. Percebe-se aqui novamente o problema da leitura que induz a uma abordagem discreta, mas nesse caso, quanto à disponibilidade no solo;

e) as tabelas são construídas para uma base regional fixa, geralmente um estado, fronteiras artificiais inexistentes na natureza (Novais & Smyth, 1999);

f) utilizam faixas de classificação genéricas para os índices de disponibilidade de P e K, como se eles fossem independentes do nível de produtividade, das espécies, variedades e, no caso de lavouras perenes, do estágio de desenvolvimento (Novais & Smyth, 1999). Assume-se, portanto, que os níveis críticos (teores do nutriente abaixo dos quais se espera resposta significativa à adubação) são os mesmos para todos os níveis de produtividade. Como corolário, as tabelas quase sempre indicam doses fixas independentes da produtividade ou, na melhor das hipóteses, doses para faixas de produtividade pré-fixadas. Mesmo sabendo-se que isso é uma consequência da necessidade de simplificação, deve-se sempre ter em mente os significativos erros que podem estar incorporados em valores médios;

g) dificilmente seria possível executar a experimentação necessária em todas as possíveis combinações de fatores (solo x ambiente x cultura, etc) de toda uma região.

Assim, são conduzidos experimentos em condições selecionadas que buscam uma representatividade mais próxima possível em relação às supostas condições futuras. O termo “condições selecionadas” aponta para um certo grau de subjetivismo;

h) as tabelas são construídas com resultados médios dessas condições selecionadas, buscando representar uma região tão ampla quanto um estado. Assim, têm forçosamente que englobar resultados muito distintos entre si num pequeno grupo de valores, em nome da facilidade de utilização. Como resultado, o profissional se vê obrigado a utilizar, por meio das tabelas, médias que podem diferir em muito das condições de sua realidade. Não há, na estrutura lógica das tabelas, indicações para os profissionais que desejarem adaptar as sugestões da tabela para a realidade de seu ambiente de trabalho e, assim, isso será feito segundo critérios de caráter subjetivo, situação que dá margem a decisões com alta probabilidade de erro;

i) a condução de experimentos de adubação no campo apresenta exigências estritas como conseqüências de normas das técnicas experimentais, ditadas pelos princípios da análise estatística dos resultados (controle local da variabilidade, casualização e repetição, segundo Banzatto & Kronka, 1989). Para atender tais exigências, é necessário um grande número de parcelas experimentais (tratamentos e suas repetições) em um mesmo local, além da repetição em diferentes locais. A necessidade de redução no custo de implantação e condução desses ensaios de adubação leva à utilização de parcelas com área muito pequena em relação à área normalmente plantada com a cultura. Dessa forma, são empregados artificialismos na aplicação dos fertilizantes e de outros tratos culturais não utilizados na prática normal da lavoura. Evidentemente, isso faz com que as condições experimentais difiram muito das verdadeiras condições de condução das lavouras, tornando temerária a extrapolação dos resultados;

j) a estruturação das recomendações na forma de tabelas não permite a fácil incorporação, de forma imediata pelo usuário, de novos conhecimentos nem adaptações regionalizadas, ou seja, pode ser considerada uma estrutura aberta à evolução, mas exige a participação de especialistas;

k) a estruturação das sugestões em termos de doses fixas para faixas de teores contraria a moderna tendência de agricultura de precisão, que preconiza um manejo específico para cada sítio, considerando, em alguns casos, células de manejo com apenas alguns metros quadrados, justificando-se na elevada variabilidade espacial das características químicas dos solos (Dampney et al., 1997, França et al., 2000, Schlindwen & Anghinoni, 2000);

l) há grande variabilidade nas sugestões feitas por diferentes tabelas para uma mesma cultura. Segundo Novais & Smyth (1999), uma comparação entre as tabelas de diferentes estados brasileiros mostra diferentes números para condições semelhantes de solo e cultivo;

m) a obtenção de curvas de resposta envolve, quase sempre, experimentos em que apenas um fator (um nutriente, por exemplo) é a variável independente, por ser esse o tipo de experimento mais simples e barato. Esse fato, no entanto, representa, segundo Bataglia & Quaggio (2000), a maior limitação das curvas de resposta, pois a resposta a um dado nutriente é estudada na condição supostamente ideal dos demais, o que dificilmente acontece devido às freqüentes interações entre os nutrientes.

Apesar de suas limitações, as tabelas trouxeram grande contribuição, uniformizando as recomendações. Deve-se reconhecer que incorporam vasta experiência de pesquisa e, por isso, podem servir como balizadoras dos resultados de novos sistemas de cálculo. Em outras palavras, mesmo considerando que as sugestões de doses de nutrientes feitas pelas tabelas sejam médias que podem ser inapropriadas para algumas condições específicas, são, em geral, doses 'testadas' em termos de economicidade da prática da adubação. Assim, as doses calculadas por outros sistemas poderão diferir daquelas sugeridas pelas tabelas em função das premissas adotadas (por exemplo, quanto ao balanço de nutrientes no ecossistema agrícola), mas deverão estar próximas delas na maioria das situações.

3.1.3 Melhor aproveitamento das informações de experimentos de adubação

Mesmo considerando as limitações já descritas, as tabelas com sugestões de adubação são muito populares, o que pode ser creditado à sua simplicidade e à

impressão que trazem aos seus usuários de que um problema técnico complexo foi tratado e 'resolvido' por especialistas (pesquisadores). No Brasil, são a base de todo o processo de diagnóstico e recomendação de adubação para as culturas (Bataglia & Quaggio, 2000).

Como já comentado, as tabelas são o resultado da simplificação de uma realidade complexa. Isso foi benéfico num momento de necessidade de uniformização das recomendações, mas teve o efeito colateral de ocultar as variáveis envolvidas na resposta das plantas aos fertilizantes, tirando dos profissionais a possibilidade de realizar adaptações com critérios científicos. Outra consequência é que a estrutura das tabelas não favorece a evolução das recomendações, justificando-se, dessa forma, o estudo de alternativas.

Além disso, pode-se dizer que o simples ajuste de modelos matemáticos aos resultados de experimentos de adubação visando à construção de tabelas práticas, significa um baixo aproveitamento do potencial das informações geradas em tais experimentos. Keulen (1986), citando Wit (1953), sugere uma maneira de expressar os resultados desses experimentos que propicia mais esclarecimentos que apenas a curva de resposta. Para isso, entretanto, é necessário que tanto o rendimento quanto a composição química das plantas tenha sido determinada, o que, infelizmente, é raro nesses experimentos.

Segundo Keulen (1986), deve-se sempre ter em mente que o objetivo dos experimentos de adubação é estudar o efeito do nutriente na produtividade e, assim, deve-se levar em conta dois fatos: 1) nem todo o nutriente do fertilizante aplicado ao solo é aproveitado (absorvido) e; 2) o efeito da porção que é absorvida varia conforme as condições da planta e do ambiente. No entanto, a apresentação dos resultados na forma de curvas de resposta não fornece indicações da importância relativa desses fatos no resultado final.

O método sugerido por Keulen (1986) consiste de três gráficos preparados com resultados de experimento de adubação nitrogenada na cultura do arroz (Figura 3). No primeiro quadrante, indicado pela letra 'a', está apresentada a relação entre o rendimento de grãos e o acúmulo total do nutriente na parte aérea (grãos e parte vegetativa). Os valores nesse quadrante são calculados pela multiplicação da quantidade de grãos e parte vegetativa pelas suas respectivas concentrações de N. O quadrante 'b' compartilha o eixo de quantidade absorvida com o quadrante 'a', enquanto no eixo vertical é indicada a quantidade de nutriente aplicada ao solo. O quadrante 'c' mostra a relação entre as doses de fertilizantes aplicadas e o

rendimento de grãos, ou seja, contém as curvas de resposta tradicionais, embora numa posição espelhada.

Os gráficos da figura 3 também não são capazes de demonstrar as causas dos resultados observados, mas são mais esclarecedores que as curvas de resposta tradicionais. São capazes de prover bases para hipóteses a serem testadas em futuros experimentos e de fornecer tendências de comportamento para importantes índices que influenciam no manejo da adubação e, portanto, que devem ser utilizados na estruturação de modelos mais apropriados que as tabelas. Exemplos de índices que podem ser derivados da figura 3 são a taxa de recuperação do nutriente adicionado (eficiência do fertilizante) e eficiência de utilização do nutriente (EUN), que é a relação entre a produção obtida, da parte aérea ou produção do componente de interesse econômico, por unidade de nutriente absorvido.

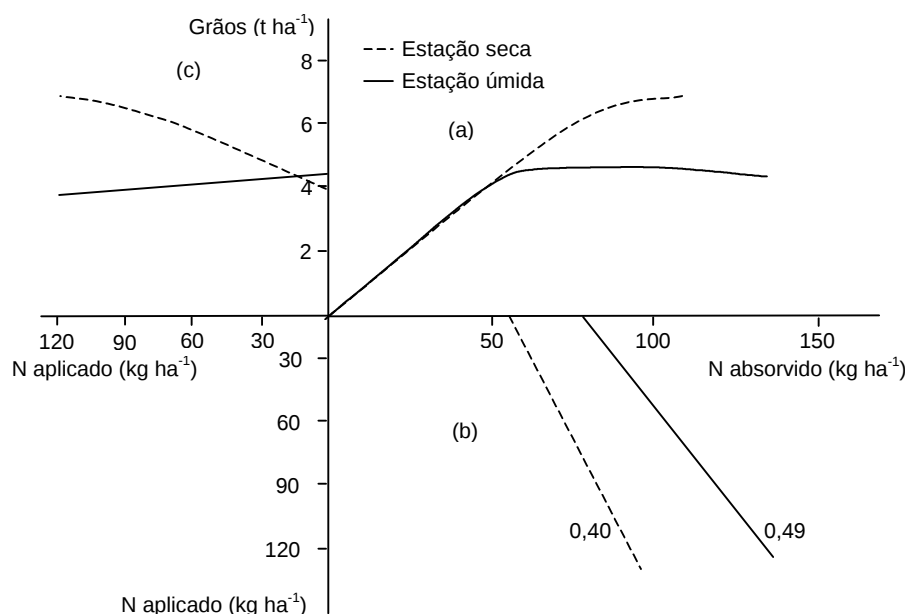


Figura 3. Relações entre N aplicado e produtividade de grãos e N absorvido pelas plantas de arroz.

Fonte: Tanaka (1964), citado por Keulen (1986).

Por exemplo, pode-se observar na figura 3, que nas menores quantidades de N absorvido existe relação linear entre a quantidade absorvida e o rendimento de grãos. Isso reflete a existência de uma concentração mínima de N para o crescimento e produção, que é a mesma nas duas épocas de cultivo nas menores quantidades de N absorvido, mas apresenta variabilidade, diferenciada conforme a época, nas maiores quantidades absorvidas. A razão para esse comportamento é

que nas menores quantidades absorvidas, a produtividade é controlada principalmente pelo suprimento do nutriente, mas nas quantidades mais elevadas o efeito de outros fatores se torna mais importante. Como o tipo desses fatores e sua intensidade variam entre as épocas de plantio, observa-se um comportamento diferenciado na eficiência de utilização. O mesmo efeito é relatado para várias culturas e nutrientes no trabalho de Keulen (1986).

Pode-se argumentar que o princípio apresentado no parágrafo anterior não é novo, pois nada mais é do que a 'Lei do Mínimo' ou 'Lei de Liebig'. No entanto, deve ser lembrado que o gráfico demonstra a relação entre o nutriente absorvido e a produção enquanto que esse princípio foi inicialmente percebido para a relação entre a disponibilidade do nutriente no solo e a produção. Como existe variabilidade no índice de aproveitamento dos fertilizantes, demonstrada no quadrante 'b', fica evidenciado que a modelagem da resposta das plantas deve considerar separadamente esses dois fatores (eficiência de utilização e taxa de recuperação dos nutrientes dos fertilizantes).

No quadrante 'b' ficam igualmente claras outras importantes informações. O ponto em que as linhas tocam o eixo horizontal nesse quadrante corresponde à quantidade de nutriente absorvida na ausência de aplicação de fertilizante. Portanto, é o suprimento natural do nutriente pelo solo. Observa-se, também, diferença no suprimento de N conforme a estação, o que é comum devido à disponibilidade desse nutriente estar relacionada com a atividade microbiana do solo e, sendo assim, dependente de fatores ambientais. A inclinação das linhas no quadrante 'b' corresponde à relação entre o nutriente fornecido e o absorvido. É uma estimativa da eficiência da fertilização (ou taxa de recuperação do nutriente aplicado). Os números do quadrante 'b' indicam uma maior eficiência do fertilizante na estação úmida (49 %) em relação à estação seca (40 %). Como a resposta à adubação nitrogenada, em termos de produção de grãos, ocorreu apenas na estação seca pode-se concluir que essa maior eficiência do fertilizante na estação úmida pode ser devida à produção de maior biomassa de parte aérea em detrimento da produção de grãos.

3.2. Alternativas à utilização de tabelas

As limitações apontadas para as tabelas justificam a busca por novos métodos de recomendação, mesmo considerando-se as diversas lacunas em nosso entendimento atual sobre os processos do sistema solo-planta-atmosfera e nos

aspectos fisiológicos e bioquímicos que relacionam o “*status*” nutricional da planta com sua produtividade, o que dificulta a modelagem da resposta das plantas à adubação (Novais & Smyth, 1999).

Várias alternativas têm sido propostas, mas serão discutidas aqui apenas aquelas que se baseiam em premissas ou tenham utilizado métodos de cálculos que possam ser úteis para a composição do sistema proposto neste trabalho. Embora sejam destacados os pontos positivos e negativos de cada proposta, o objetivo da discussão não é determinar seu mérito. Todo e qualquer modelo, por ser uma simplificação de uma realidade muito complexa, pode ser questionável pelo menos em algum ponto, o que inclui o sistema a ser proposto neste trabalho. Os métodos seguintes não fogem a essa regra, mas apesar de suas limitações, indiscutivelmente acrescentam maior flexibilidade às recomendações que as tabelas.

3.2.1 Curva de resposta estimada

Estimar uma curva de resposta e usá-la para recomendações de adubação foi um método proposto por Johnson (1991) e Raij & Cantarella (1996), com algumas abordagens semelhantes, embora com formas de cálculo diferentes. Assumindo-se que a resposta das culturas aos fertilizantes seja descrita matematicamente por uma equação de segundo grau, estima-se uma curva de resposta específica para cada gleba e, ou nutriente, por meio de cálculos que definem os coeficientes da equação, utilizando relações empíricas oriundas de experimentos realizados em condições edafo-climáticas semelhantes. Assume-se também que uma produtividade máxima pode ser alcançada como função de um teor disponível ótimo do nutriente no solo, ou nível crítico, e que a proporção entre a disponibilidade atual e o nível crítico ocorre também entre a produtividade atual e a produtividade máxima. Portanto, a proporção ‘teor atual / nível crítico’ pode ser entendida como um ‘índice de suficiência’ (IS) e é o ponto de partida para os cálculos dos coeficientes da equação quadrática que servirá para estimar as relações entre as doses de fertilizantes e a produtividade da cultura, permitindo, assim, análises econômicas da adubação, conforme comentado no item 3.1.1.

3.2.1.1. Método de Raij & Cantarella (1996)

No trabalho de Raij & Cantarella (1996), primeiramente define-se o modelo quadrático como:

$$\text{Equação 1: } Y = b_0 + b_1X + b_2X^2$$

em que

b_0, b_1, b_2 são os coeficientes da equação;

Y = produtividade;

X = dose de nutriente;

Como o coeficiente a_0 corresponde à produtividade alcançada na ausência de adubação ($X = 0$), ele pode ser denominado também de Y_0 . Os autores definiram, então, o 'Índice de Suficiência' (IS) como sendo a relação entre Y_0 e a produtividade máxima (Y_m):

$$\text{Equação 2: } IS = Y_0 / Y_m$$

Conseqüentemente, o coeficiente a_0 , ou Y_0 , pode ser calculado pela relação:

$$\text{Equação 3: } b_0 = Y_0 = Y_m \times IS$$

Os coeficientes b_1 e b_2 podem ser estimados pelas seguintes equações:

$$\text{Equação 4: } b_1 = [2 \times (Y_m - Y_0)] / X_m$$

$$\text{Equação 5: } b_2 = (Y_0 - Y_m) / (X_m)^2$$

em que

X_m = dose de nutriente que leva à produtividade máxima⁴.

Dessa forma, com IS, Y_m e X_m pode ser estimada uma equação quadrática para a gleba, com a qual é possível realizar simulações das relações entre a dose dos nutrientes e a produtividade, calculando, inclusive, a dose de nutriente mais lucrativa pela equação 6:

Equação 6: $X_e = [a_1 - (c/v)] / [2(-a_2)]$

em que

X_e = dose de maior lucratividade;

c/v = relação de preços do fertilizante e do produto agrícola;

Trabalhando com resultados de diversos experimentos com a cultura do milho no estado de São Paulo, os autores ajustaram curvas de resposta aos dados experimentais e, com estas, estimaram Y_0 e Y_m para cada experimento, calculando o índice IS. Depois, relacionaram IS com os resultados de análises de solo, de acordo com o modelo escrito na equação 7 (Quadro 2).

Equação 7: $IS = b_0 + b_1 / Z$

em que

Z = resultado da análise de solo;

b_0 e b_1 = coeficientes da equação.

⁴ A demonstração das equações 4, 5, 6, e 8 é a seguinte:

No ponto de máximo da parábola tem-se que:

$$f(X_m) = Y_m = b_2(X_m)^2 + b_1(X_m) + b_0 \text{ e que}$$

$$dY/dX = 2b_2X_m + b_1 = 0 \therefore b_1 = -2b_2X_m \therefore X_m = b_1 / -2b_2 ()$$

Portanto:

$$b_1 = [Y_m - b_2(X_m)^2 - Y_0] / X_m \text{ em que substituindo } b_1 \text{ por } -2b_2X_m \text{ obtém-se:}$$

$$-2b_2X_m = [Y_m - b_2(X_m)^2 - Y_0] / X_m \therefore -2b_2(X_m)^2 + b_2(X_m)^2 = Y_m - Y_0 \therefore (X_m)^2(b_2 - 2b_2) = Y_m - Y_0$$

$$\therefore -b_2 = (Y_m - Y_0) / (X_m)^2, \text{ que multiplicado por } -1 \text{ resulta em } b_2 = (Y_0 - Y_m) / (X_m)^2 ().$$

$$\text{Como } b_1 = [Y_m - b_2(X_m)^2 - Y_0] / X_m \text{ e } b_2(X_m)^2 = (Y_0 - Y_m), \text{ então } b_1 = [Y_m - (Y_0 - Y_m) - Y_0] / X_m \therefore$$

$$b_1 = 2(Y_m - Y_0) / X_m ()$$

O ponto de maior lucratividade (X_e , dose mais econômica) corresponde àquele em que a primeira derivada da curva de resposta é igual à relação custo/valor:

$$dY/dX = 2(a_2)X_e + a_1 = (c/v) \therefore X_e = [(c/v) - a_1] / 2a_2, \text{ que multiplicado por } -1 \text{ resulta em}$$

$$X_e = [a_1 - (c/v)] / 2(-a_2)$$

Quadro 2. Equações de regressão para estimativa do índice de suficiência (IS) utilizando resultados de análises de solo

Variável independente	Equação de regressão	Coeficiente de correlação
Matéria orgânica	IS = 0,811 – 0,291 / MO	0,222 ^{ns}
P-Resina	IS = 0,938 – 2,018 / P	0,702**
K trocável	IS = 1,105 – 0,0361 / K	0,813**

Observação: embora o coeficiente de correlação entre IS e teor de matéria orgânica (MO) não tenha sido significativo, os autores utilizaram a equação, pois o objetivo do artigo não era estabelecer um método definitivo, mas apenas demonstrar a utilização da técnica.

Fonte: Raij & Cantarella (1996)

O valor Y_m corresponde, nesse caso de uso prático do modelo quadrático, a uma meta de produtividade, que deve ser estabelecida de acordo com a realidade local, utilizando critérios tais como o histórico de uso do solo, variedades usadas na região e condições climáticas (Raij & Cantarella, 1996). Esses autores propõem uma relação empírica entre a disponibilidade de P e a produtividade máxima.

O valor X_m também pode ser calculado por meio de curvas de resposta ajustadas, conforme a equação 8:

Equação 8: $X_m = a_1 / (-2a_2)$

Segundo Raij & Cantarella (1996), calculando-se a relação X_m/Y_m para os vários experimentos utilizados como fonte de dados para o modelo, o valor médio da relação resultou em 0,0185 para o N. Assim, para a estimativa de X_m , os autores sugeriram, para cultura do milho no Estado de São Paulo, a utilização da relação $X_m = 0,02Y_m$. No entanto, uma relação semelhante não foi possível para os nutrientes P e K devido a discrepâncias nos dados e, por essa razão, os autores trabalharam com valores médios (80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 60 kg ha⁻¹ de K₂O).

Em resumo: com um resultado de análise de solo estima-se IS (Equação 7). É estabelecido um objetivo de produtividade (Y_m) e utiliza-se uma estimativa da dose necessária para a máxima produtividade (X_m). Com tais valores é estimada uma equação quadrática para a gleba, com a qual podem ser feitas simulações sobre o efeito dos nutrientes na produtividade.

Trabalhando com resultados de experimentos de adubação na cultura do milho, Raij & Cantarella (1996) concluíram que as estimativas de doses mais lucrativas e acréscimos de produtividade fornecidas pela equação estimada foram, na média, ligeiramente mais elevadas que os valores determinados experimentalmente, mas com pronunciadas diferenças em casos isolados.

Entretanto, os lucros finais calculados, pelos dois processos (curva estimada e curva experimental) foram muito próximos e, dessa forma, esses autores acreditam que essa abordagem pode ser empregada com sucesso em recomendações de adubação.

A utilização de curvas de respostas estimadas, conforme sugerido por Raij & Cantarella (1996), representa, sem dúvida, maior flexibilidade que as tabelas. Somente o fato de fornecerem estimativas de doses de nutrientes que variam de forma contínua em relação à produtividade esperada já é uma melhoria significativa.

Pela descrição do método percebe-se que, para cada conjunto de resultados experimentais utilizado, são calculados diferentes coeficientes e, portanto, são obtidas diferentes estimativas para curva de resposta. Assim, a representatividade da curva estimada e, conseqüentemente, a qualidade das previsões (recomendações), é sujeita a melhorias. Deve-se reconhecer, portanto, que esse é um sistema propenso a aperfeiçoamentos por meio de processo lógico e objetivo, sendo esse fator uma vantagem em relação às tabelas.

A origem dos resultados experimentais utilizados para estimar a curva determina sua abrangência, que pode ser apenas uma propriedade agrícola ou toda uma região, desde que esta seja uniforme em termos de clima e solo. É razoável a suposição de que quanto maior a abrangência dos resultados, englobando, portanto, regiões agrícolas e manejo da cultura mais diferenciados, menor será a exatidão das recomendações e vice-versa. Visto por esse ângulo, esse processo se assemelha à criação de normas no método DRIS ("Diagnosis and Recommendation Integrated System") (Beaulfis, 1973, Jones, 1981 e Walworth and Sumner, 1987).

Uma limitação importante à utilização desse sistema é a falta de um índice de disponibilidade confiável para o N. Embora sejam bem conhecidas as diversas formas químicas de N no solo que podem ser aproveitadas pelas plantas, a dinâmica das transformações desses compostos, por ser mediada por microrganismos, é fortemente influenciada por fatores ambientais, tornando dificultosa sua quantificação por meio de processos rotineiros de análises (Goh & Haynes, 1986). Raij & Cantarella (1996) não obtiveram sucesso com a utilização do teor de matéria orgânica para previsão do índice de suficiência (IS) para o N (Quadro 2).

Além disso, pode ser questionado se o modelo utilizado para relacionar os resultados de análise de solo com IS é o mais adequado. Os autores não apresentaram justificativas para a opção pelo modelo descrito na equação 7, dificultando uma discussão mais circunstanciada. Sabe-se que essa equação para

relacionar a produtividade com resultados de análises de solo foi proposta originalmente por Semb & Uhlen (1954), mas Raij & Cantarella (1996) não se referem a esses autores e não discutem a validade da equação. Para exemplificar o comportamento desses modelos, foram criados gráficos com as equações do quadro 2, para P e K (Figura 4), calculando-se os valores de IS para os limites superiores dos intervalos das classes de interpretação atualmente adotadas no estado de São Paulo (Quadro 3).

Quadro 3. Valores de índice de suficiência (IS) calculados com as equações do quadro 2 para os teores de P e K estabelecidos como limites superiores das classes interpretativas dos resultados de análise de solo atualmente adotadas no Estado de São Paulo

	Classes de teor (segundo Raij et al., 1996)							
	Muito Baixo		Baixo		Médio		Alto	
	P	K	P	K	P	K	P	K
	mg dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³	mg dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³	mg dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³	mg dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³
Teor	3,0	0,07	15,0	0,15	40,0	0,30	80,0	0,60
IS	0,26	0,60	0,80	0,86	0,89	0,98	0,91	1,04

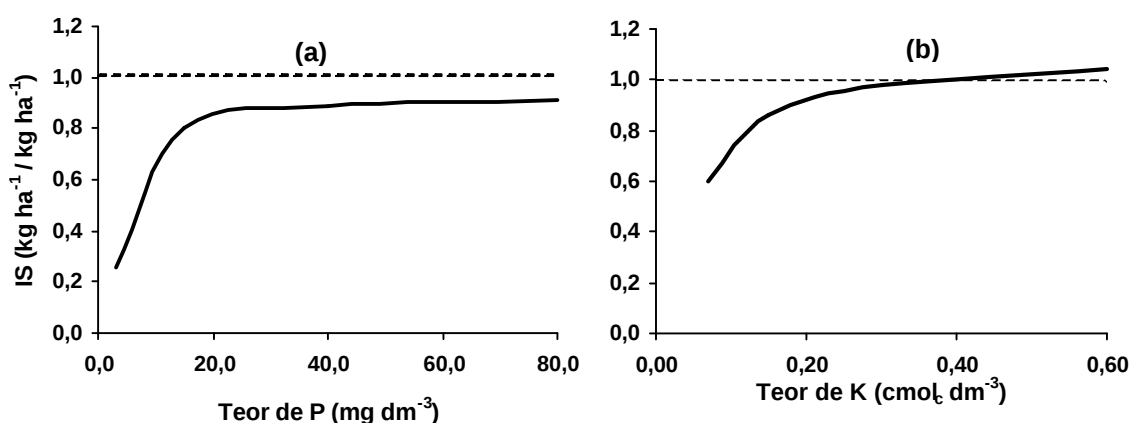


Figura 4. Variação do valor do Índice de Suficiência (IS) de acordo com resultados de análises de solo para P (a) e K (b).

Pode-se constatar que o valor IS para K pode atingir valores maiores que 1 para teores elevados desse nutriente no solo, o que causaria Y_0 maior que Y_m e, portanto, estimativa de valores positivos para o coeficiente a_2 (Equação 5). Como consequência, a equação de segundo grau estimada teria a concavidade voltada para cima, ou seja, atingiria um mínimo em vez de um máximo, o que é incompatível com a resposta das plantas à adubação. De fato, o valor de IS deve ser sempre inferior a 1, pois sendo igual a 1 os coeficientes a_1 e a_2 teriam valor zero (Equações 4 e 5) e não seria obtida uma curva de resposta quadrática, mas uma reta paralela

ao eixo horizontal. Portanto, deve ser feito um alerta, não mencionado pelos autores, de que a equação sugerida para cálculo do valor de IS para K somente é válida para teores menores que $0,34 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, teor que corresponde a $IS = 1,0$ e, portanto, ao nível crítico. Para teores iguais ou mais elevados que esse deve ser adotado sempre o valor 1,0.

A equação sugerida por Raij & Cantarella (1996) para cálculo do IS para P não permite valores iguais ou superiores a 1, nem mesmo em teores muito elevados desse nutriente no solo. Portanto, para o P não há o risco de estimativas inadequadas para as curvas de resposta, como pode acontecer com o K.

O limite superior da classe de teores considerados médios para o P corresponderia a valores de IS que estimariam uma redução de 11 % na produtividade máxima, o que está de acordo com a filosofia de classificação de teores exemplificadas na figura 2. Isso, no entanto, não acontece para o K, pois o valor de IS para a classe de teores médios causaria estimativas de redução de apenas 2 % na produtividade máxima.

Supondo-se um solo com $4,8 \text{ dag dm}^{-3}$ de C, teor de P-resina de 12 mg dm^{-3} e de K trocável de $0,14 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, com uma meta de produtividade de 6.000 kg ha^{-1} (milho) e relação custo/valor⁵ de 7, 8 e 4 respectivamente para N, P_2O_5 e K_2O , seriam estimadas as seguintes equações:

$Y_m = 6000 \text{ kg ha}^{-1}$ de milho

Para N:

$$MO = 4,8 \text{ dag dm}^{-3}$$

$$IS = 0,811 - 0,291 / 4,8 = 0,75$$

$$Y_0 = 6.000 \times 0,75 = 4.500$$

$$X_m = 6.000 \times 0,02 = 120 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de N}$$

$$a_0 = 4500$$

$$a_1 = [2 \times (Y_m - Y_0)] / X_m = [2 \times (6.000 - 4.500)] / 120 = 25$$

$$a_2 = (Y_0 - Y_m) / (X_m)^2 = (4500 - 6000) / (120)^2 = -0,10417$$

$$Y = 4.500 + 25X - 0,10417X^2$$

$$X_e = [a_1 - (c/v)] / [2 \times (-a_2)] = [25 - 7] / [2 \times (-0,10417)] = 86 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de N}$$

Para P:

$$P\text{-Resina} = 12 \text{ mg dm}^{-3} \text{ de P}$$

$$IS = 0,938 - 2,018 / P = 0,77$$

$$Y_0 = 6.000 \times 0,77 = 4620$$

⁵ Uma relação custo/valor de 7, por exemplo, significa que são necessários 7 kg de milho para comprar 1 kg de nutriente. Os valores propostos são médias históricas, de acordo com Raij & Cantarella (1996).

$$X_m = 80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de P}_2\text{O}_5$$

$$a_0 = 4.620$$

$$a_1 = [2 \times (Y_m - Y_0)] / X_m = [2 \times (6.000 - 4.620)] / 80 = 34,5$$

$$a_2 = (Y_0 - Y_m) / (X_m)^2 = (4.620 - 6.000) / (80)^2 = -0,2156$$

$$Y = 4.620 + 34,5X - 0,2156X^2$$

$$X_e = [a_1 - (c/v)] / [2 \times (-a_2)] = [34,5 - 8] / [2 \times (-0,2156)] = 61 \text{ kg ha}^{-1}$$

Para K:

$$K \text{ trocável} = 0,14 \text{ cmol dm}^{-3}$$

$$IS = 1,105 - 0,0361 / K = 0,85$$

$$Y_0 = 6.000 \times 0,85 = 5.100$$

$$X_m = 60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de K}_2\text{O}$$

$$a_0 = 5.100$$

$$a_1 = [2 \times (Y_m - Y_0)] / X_m = [2 \times (6.000 - 5.100)] / 60 = 30$$

$$a_2 = (Y_0 - Y_m) / (X_m)^2 = (5.100 - 6.000) / (60)^2 = -0,25$$

$$Y = 5.100 + 30X - 0,25X^2$$

$$X_e = [a_1 - (c/v)] / [2 \times (-a_2)] = [30 - 4] / [2 \times (-0,25)] = 52 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de K}_2\text{O}$$

As doses indicadas, para o mesmo solo e meta de produtividade desse exemplo, pelas tabelas atualmente adotadas no Estado de São Paulo (Raij et al., 1996) seriam entre 40 e 80 kg ha⁻¹ de N (dependendo da resposta esperada ao N, que é determinada de acordo com o histórico da área), 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 50 kg ha⁻¹ de K₂O. São muito semelhantes, portanto, às doses mais lucrativas calculadas com as equações estimadas (86 kg de N, 61 de P₂O₅ e 52 de K₂O), embora apenas um exemplo comparativo não seja suficiente para conclusões definitivas. Mas independente da comparação quantitativa dos resultados desse método com as tabelas, pode-se dizer que ele proporciona mais flexibilidade, pois permite simulações com diferentes metas de produtividades e relações custo/valor, o que não é contemplado na utilização das tabelas.

3.2.1.2. Método de Johnson (1991)

As premissas utilizadas por esse autor são duas: a) o conceito de Mitscherlich, de que a produtividade como resposta a uma determinada dose de nutriente pode ser expressa como uma fração da produtividade máxima que é proporcional à dose de nutriente e b) a relação, proposta por Bray (1954), entre a mobilidade do nutriente no solo e o seu requerimento pela planta.

Bray (1954) estabelece que o requerimento, pela planta, de nutrientes de elevada mobilidade no solo é uma quantidade 'líquida'⁶ determinada principalmente pela magnitude da produtividade e pela concentração do nutriente ótima da cultura, enquanto que para os nutrientes de baixa mobilidade, o requerimento tende a ser constante, podendo ser expresso como 'concentração' ótima do nutriente no solo, em vez de uma quantidade variável com a produtividade. A magnitude dessa concentração ótima é constante para um mesmo tipo de planta, sistema de plantio e densidade populacional, e para condições relativamente constantes de solo e clima.

Explica-se esse conceito pelos extremos de mobilidade das formas disponíveis dos nutrientes no solo, que dão origem a dois tipos de 'zonas de absorção' radiculares. Uma delas é o volume de solo explorado pelo sistema radicular como um todo, de onde a planta obtém os nutrientes móveis, como o N. A outra é uma fina camada de solo adjacente à superfície de cada raiz (até 1 mm), de onde a planta obtém os nutrientes de baixa mobilidade, como P. No caso dos nutrientes pouco móveis, portanto, as raízes exploram um volume de solo muito pequeno, mesmo considerando-se a soma do volume explorado por todas as raízes, e poderiam exaurir os nutrientes apenas desse pequeno volume, portanto, não interferindo significativamente na quantidade total das formas disponíveis no volume de solo como um todo. Com o crescimento das plantas e, ou, aumento de seu número haverá também um aumento na quantidade das raízes. Um acréscimo proporcional no volume de solo e, ou, na quantidade de nutrientes nele existente será necessário para suprir a demanda adicional pelos nutrientes móveis. No entanto, para os nutrientes de baixa mobilidade não há competição entre as raízes, ou seja, novas raízes estarão explorando novos volumes de solo que ainda contêm a mesma concentração do nutriente, supondo-se uma distribuição homogênea do nutriente no volume de solo. Se a concentração, no solo, desses nutrientes de baixa mobilidade é suficiente para garantir um crescimento adequado da planta, as novas e mais numerosas raízes, em caso de aumento de produtividade, também se desenvolverão em volumes de solo que possuem essa mesma concentração adequada⁷. Isso corresponde a dizer que para os nutrientes de baixa mobilidade, o

⁶ Como 'líquida', Bray (1954) entende a quantidade disponibilizada pelo solo depois de descontadas as perdas. Essa ressalva é importante por permitir que a quantidade disponibilizada pelo solo seja estimada, para os nutrientes móveis, a partir da quantidade absorvida pela cultura.

⁷ A concentração aqui referida é a quantidade de P por volume de solo (teor). Não confundir com concentração de P na solução do solo (fator Intensidade), que induziria a conclusões muito diferentes (Novais & Smyth, 1999)

que determina a produtividade não é a sua quantidade disponível no solo, mas a sua concentração ou teor.

As considerações de Bray (1954) suscitam várias consequências para estudos da fertilidade do solo. Uma das principais, utilizada por Johnson (1991), estabelece que a resposta das plantas aos nutrientes de elevada mobilidade no solo não segue o modelo de resposta de Mistherlich, mas a Lei do Mínimo ou de Liebig. Sendo aplicável a equação de Mistherlich ($Y = A(1 - 10^{-c(x+b)})$), então o requerimento do nutriente no solo seria o valor 'b' quando for igual à meta de produtividade (A) e qualquer valor menor de 'b' irá sempre causar uma produtividade proporcionalmente menor, isto é, será suficiente para uma certa porcentagem da produtividade máxima (A). Esse raciocínio permite a utilização do 'índice de suficiência' (IS) para os resultados de análises de P e K, conforme foi feito nos trabalhos de Raij & Cantarella (1996), discutido anteriormente, e no trabalho de Johnson (1991), discutido a seguir.

De fato, resulta do conceito de Bray (1954) que o termo 'requerimento nutricional' do nutriente no solo é o nível do nutriente no solo necessário para atingir uma determinada meta de produtividade, mas esse requerimento somente deve ser entendido como 'quantidade disponível' para os nutrientes móveis, uma vez que o aumento de produtividade não interfere na quantidade total do nutriente no solo para os nutrientes de baixa mobilidade, conforme já discutido. Assim, para os nutrientes de baixa mobilidade, o resultado da análise de solo é um 'índice de disponibilidade' que dispensa a correlação com a quantidade total do nutriente no solo. Uma analogia com as réguas utilizadas para medir o nível de líquidos em tanques, como aquelas utilizadas em postos de gasolina, ajuda a entender essa idéia (Figura 5). As marcas na régua (os resultados analíticos) determinam o nível do líquido do tanque, mas nada informam, diretamente, sobre a quantidade de líquido existente. Em outras palavras, são índices de preenchimento de uma quantidade, mas não a quantidade em si.

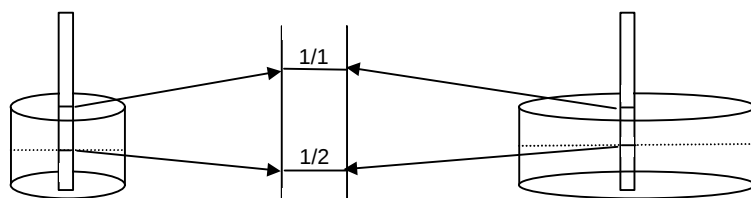


Figura 5: Analogia entre o resultado da análise de solo e as réguas de verificação de volume em tanques. Notar como uma mesma marca na régua ($1/1 = \text{cheio}$ ou $1/2 = \text{pela metade}$) pode ter diferentes significados em termos de quantidade de líquido dependendo do tamanho do tanque.

Johnson (1991) descreve o seu método a partir da expressão do rendimento da cultura como função de todas as condições ambientais que interferem no crescimento (fatores de crescimento) e de uma meta (ou limite) de produtividade estabelecida pelo manejo. Matematicamente, tem-se que:

$$\text{Equação 9: } Y = f(Y_g, FC)$$

em que

Y = produtividade da cultura;

Y_g = meta de produtividade;

FC = agregação de todos os fatores que interferem no crescimento e produção, incluindo a disponibilidade de nutrientes.

Uma vez que a influência de um fator de crescimento seja entendida, ou seja, possa ser quantificada, seu efeito pode ser expresso separadamente dos demais fatores:

$$\text{Equação 10: } Y = f(Y_g, FC, Y_N, Y_P, Y_K)$$

em que

Y_N , Y_P e Y_K representam a influência, na produtividade, da disponibilidade de N, P e K, respectivamente.

Segundo Johnson (1991), os dois maiores componentes da resposta em produtividade a um nutriente são as respostas às formas e quantidades do nutriente no solo e ao nutriente aplicado na forma de fertilizante. Quando a influência do nutriente na produtividade é expressa na forma de uma fração que relaciona o status de disponibilidade atual em relação à disponibilidade considerada ótima, a equação 10 pode ser expressa da seguinte forma:

$$\text{Equação 11: } Y = Y_g \times FC \times Y_N \times Y_P \times Y_K$$

Nessa equação, o componente FC varia de 0 a 1, refletindo o grau de eventuais impactos negativos sobre a produtividade, tais como problemas fitossanitários, climáticos, de manejo, etc. O produto $(Y_g \times FC)$, assim, é a produtividade possível, isto é, a produtividade que poderia ser alcançada em uma

dada condição ambiental e se todos os nutrientes se apresentassem em disponibilidade ótima.

Os componentes Y_P e Y_K são obtidos a partir de resultados de análises de solo calibrados de forma a poderem ser expressos como um índice de suficiência percentual e indicarem a quantidade de nutriente que deveria ser adicionada na forma de fertilizantes para que se atinja 100 % da produtividade possível (Quadro 4).

Quadro 4. Calibração de resultados de análise de P (extrator Mehlich-3 ou Bray-1) e K (extrator acetato de amônio) para trigo utilizada no estado de Oklahoma (EUA)

Resultado da análise de solo	Índice percentual de suficiência do nutriente	Necessidade de fertilizante
P		
(mg dm ⁻³)	%	(kg ha ⁻¹)
0	25	40
10	45	30
20	80	20
40	90	10
65	100	0
K		
0	50	56
75	70	46
125	80	37
200	95	18
250	100	0

Fonte: Hanlon & Johnson (1984), citados por Johnson (1991)

Por exemplo, o componente Y_P seria calculado pela equação:

$$\text{Equação 12: } Y_P = (P_s + \beta_1(P_f/P_d)(100 - P_s) - \beta_2(P_f/P_d)^2(100 - P_s))/100$$

em que

P_s = índice de suficiência percentual do P no solo;

P_d = dose de fertilizante fosfatado para atingir 100% da produtividade possível;

P_f = quantidade de fertilizante aplicado;

β_1 e β_2 = respectivamente, os coeficientes linear e quadrático da resposta ao fertilizante aplicado, para os quais podem ser assumidos os valores 2 e 1 como primeira aproximação.

O termo $(100 - P_s)$ delinea a máxima resposta obtida ao fertilizante fosfatado. Por exemplo, se a análise de solo identifica o P disponível no solo como suficiente para 70%, então a máxima resposta a ser obtida seria um acréscimo de 30%. O grau de tentativa da correção da deficiência de P é dada pela relação P_f/P_d . A utilização da potência 2 no segundo termo da equação garante a forma quadrática da curva.

De fato, a relação entre análise de solo para P e Y_P descrita pela equação 12 é uma parábola que descreve perfeitamente as relações agronômicas envolvidas. Quando a dose aplicada é igual à dose recomendada no quadro 4, ou seja, a relação P_f/P_d é igual a 1, obtém-se sempre um Y_P igual a 1,0 para qualquer resultado de análise de solo. Numa simulação em que é feita variar a proporção aplicado/recomendado (relação P_f/P_d) entre 0 e 200 %, obtém-se uma parábola voltada para baixo, cujo ponto de máximo é igual a 1,0 e, segundo a qual, a utilização de doses acima da recomendada causa redução na produtividade (Figura 6). Além disso, quando se comparam dois solos diferentes em relação à disponibilidade de P, percebe-se que a variabilidade da dose aplicada influencia mais no Y_P no solo mais pobre (linha cheia, P disponível de 10 mg dm^{-3}) que em solos cuja disponibilidade se aproxima mais do ideal (linha tracejada, P disponível de 40 mg dm^{-3}).

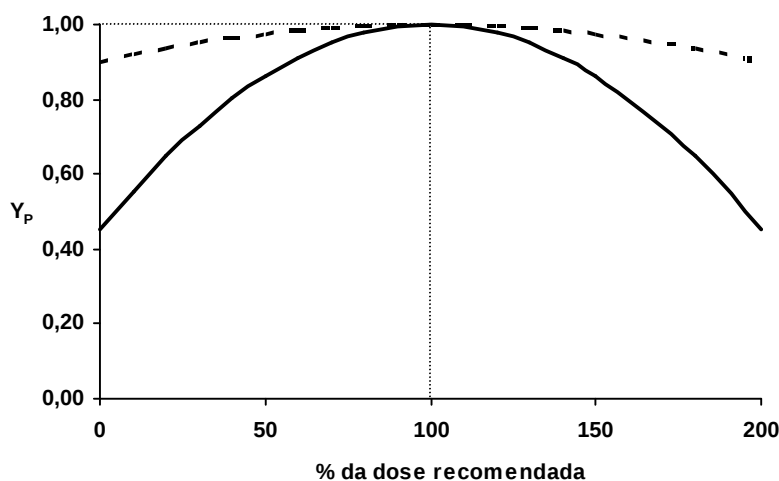


Figura 6. Relação entre Y_P e P_f/P_d , preparada de acordo com a equação 12 e quadro 4, supondo um resultado de análise de P de 10 mg dm^{-3} (linha cheia, IS = 45% e dose recomendada de 30 kg ha^{-1} de P) e de 40 mg dm^{-3} (linha pontilhada, IS = 90% e dose recomendada de 10 kg ha^{-1} de P)

Nesse aspecto, portanto, o método de Johnson (1991) é mais consistente que o proposto por Raij & Cantarella (1996), no qual IS pode atingir valores que impedem a estimativa adequada da curva de resposta (Figura 4 e discussão correspondente).

Uma coincidência interessante acontece quando se compara a relação, proposta por Johnson (1991), entre os resultados de análise de solo e o IS (Quadro 4), com a classificação de resultados de análises utilizados no Brasil. Estimando-se um ajuste para a relação estabelecida no quadro 4, obtêm-se equações quadráticas com um elevado coeficiente de determinação (Figura 7). O mesmo acontece se os valores de IS adotados para as quatro classes de disponibilidade do quadro 4 forem

relacionados com os limites superiores das classes de interpretação adotadas em Minas Gerais (Alvarez et al., 1999) e São Paulo (Raij et al., 1996) (Quadros 5 e 6).

Essa coincidência é oriunda da larga utilização do modelo quadrático para descrever resultados de experimentos de adubação, os quais foram utilizados para compor as classes de interpretação de análises de solo (item 3.1.2 e figura 2). Essa constatação acena com a possibilidade de utilização de um modelo quadrático, ou semelhante, que descreva genericamente a relação entre resultados de análises de solo e IS, o qual pode ser parametrizado para refletir condições específicas, conforme sugestão feita no item 4.2.2.

A utilização de uma função para estimar um valor de IS para os resultados da análise de solo é mais adequada para a construção de sistemas informatizados de recomendação do que a classificação dos teores segundo faixas de valores, como se faz no método de recomendação que utiliza as tabelas práticas (3.1.2) e como foi adotado por Johnson (1991). A vantagem da utilização de equações é que estas proporcionam a ocorrência de valores em escala contínua, evitando 'saltos' nos valores, que acontecem nas tabelas.

Equações também poderiam ser utilizadas por Johnson (1991) para obtenção da 'necessidade de fertilizantes', pois os dados do quadro 4 se adaptam muito bem a uma equação quadrática ($R^2 = 0,99$ e $0,97$ para doses de P e K, respectivamente), mas essa possibilidade não foi considerada pelo autor.

Em seu trabalho, Johnson (1991) não apresenta justificativas para os valores de IS adotados para cada resultado de análise de solo. Não há, portanto, uma explicação clara para o fato de adotarem IS de 25% e 50%, respectivamente para P e K, quando os teores tendem para zero. Em termos de fisiologia da planta, não seria correto considerar que a influência negativa da deficiência de K na produtividade é menor que a influência negativa da deficiência de P. Portanto, é mais provável que os resultados experimentais utilizados pelo autor tenham indicado uma menor sensibilidade da análise de K disponível em discriminar os teores que causam produtividades baixas, o que não aconteceu com a análise de P. Em outras palavras, as plantas estariam tendo acesso a formas de K não detectadas pela análise de solo.

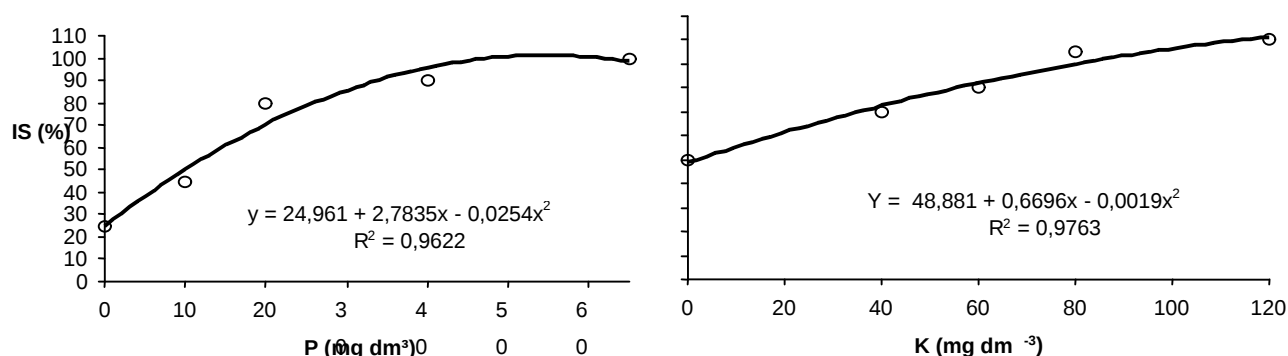


Figura 7. Equações quadráticas estimadas para a relação entre índice de suficiência (IS) e resultados da análise de solo segundo proposta de Johnson (1991) (Quadro 4).

A obtenção do componente do nutriente N (Y_N) é dificultada pela falta de um método para determinar a quantidade de N que será suprida pelo solo, como já comentado no método proposto por Raij & Cantarella (1996). Esses autores utilizaram o teor de matéria orgânica do solo, mesmo sabendo que não houve correlação significativa entre este teor e o índice de disponibilidade (IS) (Quadro 2). Para contornar a falta da informação de um índice de disponibilidade de N, Johnson (1991) propõe que se considere, separadamente, a resposta da cultura ao N aplicado como fertilizante e ao N orgânico disponível, proveniente da mineralização da matéria orgânica:

Equação 13: $Y_N = Y_{Ni} + Y_{No}$

em que

Y_{Ni} = contribuição do sub-componente N mineral (inorgânico) na influência do componente N na produtividade;

Y_{No} = contribuição do sub-componente N proveniente da mineralização dos compostos orgânicos nitrogenados na influência do componente N na produtividade.

Quadro 5. Equações estimadas para a relação entre resultados da análise de P, K e S e índice de suficiência (IS), para as faixas de interpretação adotadas no Estado de Minas Gerais. Y = IS e X = resultado da análise de solo. Os teores das classes 'Baixo' e 'Médio' correspondem à média dos limites inferior e superior da faixa de classificação adotada em MG, enquanto que os teores das classes 'Muito Baixo' e 'Bom' correspondem ao limite superior da faixa de classificação adotada. O extrator de P disponível e K trocável é o Mehlich-1 e de S disponível é o fosfato monocalcico em ácido acético.

Classe de Prem ₆₀ mg L ⁻¹	P					Equação	R ²
	Zero (IS = 25%)	Muito Baixo (IS = 45%)	Baixo (IS = 80%)	Médio (IS = 90%)	Bom (IS = 100%)		
	mg dm ⁻³						
0 a 4	0,00	3,00	3,70	5,20	9,00	$Y = 21,685 + 16,040X - 0,7930X^2$	0,88
4 a 10	0,00	4,00	5,05	7,20	12,50	$Y = 21,573 + 11,856X + 0,4357X^2$	0,89
10 a 19	0,00	6,00	7,20	9,90	17,50	$Y = 21,778 + 8,2121X - 0,2079X^2$	0,87
19 a 30	0,00	8,00	9,75	13,65	24,00	$Y = 21,703 + 6,0799X - 0,1143X^2$	0,88
30 a 44	0,00	11,00	13,45	18,85	33,00	$Y = 21,698 + 4,4089X - 0,0601X^2$	0,88
44 a 60	0,00	15,00	18,45	25,95	45,00	$Y = 21,694 + 3,2132X - 0,0318X^2$	0,88
	K						
	Zero (IS = 50%)	Muito Baixo (IS = 70%)	Baixo (IS = 80%)	Médio (IS = 90%)	Bom (IS = 100%)		
	0,00	15,00	28,00	55,00	120,00	$Y = 52,865 + 1,0243X - 0,0053X^2$	0,98
Classe de Prem ₆₀	S						
	Zero (IS = 25%)	Muito Baixo (IS = 45%)	Baixo (IS = 80%)	Médio (IS = 90%)	Bom (IS = 100%)		
0 a 4	0	1,70	2,15	3,10	5,40	$Y = 21,574 + 27,801X - 2,4029X^2$	0,89
4 a 10	0	2,40	3,05	4,35	7,50	$Y = 21,563 + 19,66X - 1,1962X^2$	0,89
10 a 19	0	3,30	4,20	6,00	10,30	$Y = 21,572 + 14,266X - 0,6294X^2$	0,89
19 a 30	0	4,60	5,80	8,20	14,20	$Y = 21,576 + 10,334X - 0,3301X^2$	0,89
30 a 44	0	6,40	7,95	11,25	19,60	$Y = 21,634 + 7,4923X - 0,1737X^2$	0,89
44 a 60	0	8,90	11,00	15,55	27,00	$Y = 21,669 + 5,3979X - 0,090X^2$	0,89

Fonte: preparada com informações de Alvarez et al. (1999).

Quadro 6. . Equações estimadas para a relação entre resultados da análise de P, K e S e índice de suficiência (IS), para as faixas de interpretação adotadas no Estado de São Paulo. Y = IS e X = resultado da análise de solo. Os teores das classes 'Baixo', 'Médio' e 'Alto', para P e K, correspondem à média dos limites inferior e superior da faixa de classificação adotada em SP, enquanto que os teores das classes 'Muito Baixo' correspondem ao limite superior da faixa de classificação adotada. Para o S, foram feitas adaptações, pois na publicação consultada constavam apenas três classes ('Baixo', 'Médio' e 'Adequado'). O extrator de P disponível e K trocável é a Resina e de S disponível é o fosfato monocálcico.

Tipo de cultura	P					Equação	R ²
	Zero (IS = 25%)	Muito Baixo (IS = 45%)	Baixo (IS = 80%)	Médio (IS = 90%)	Alto (IS = 100%)		
	 mg dm ⁻³						
Anuais	0,00	6,00	11,00	28,00	60,50	$Y = 29,713 + 3,5525X - 0,0398X^2$	0,91
Perenes	0,00	5,00	9,00	21,50	45,50	$Y = 28,408 + 4,7009X - 0,0693X^2$	0,92
Hortaliças	0,00	10,00	18,00	45,00	90,50	$Y = 28,896 + 2,2847X - 0,0167X^2$	0,91
Florestais	0,00	2,00	4,00	7,00	12,50	$Y = 23,745 + 14,982X - 0,7138X^2$	0,97
	K						
	Zero (IS = 50%)	Muito Baixo (IS = 70%)	Baixo (IS = 80%)	Médio (IS = 90%)	Alto (IS = 100%)		
	0,00	27,37	44,96	89,93	177,90	$Y = 52,116 + 0,6508X - 0,0022X^2$	0,98
	S						
	Zero (IS = 25%)	Muito Baixo (IS = 45%)	Baixo (IS = 80%)	Médio (IS = 90%)	Alto (IS = 100%)		
	0	4,00	7,50	10,00	20,00	$Y = 21,178 + 9,3333X - 0,2678X^2$	0,97

Fonte: preparada com informações de Raij et al. (1996)

O sub-componente Y_{Ni} é calculado de forma semelhante ao P e K, pela relação entre a quantidade de N mineral disponível no solo e a quantidade de N idealmente requerida pela cultura (N_r), sendo, portanto, necessário calcular essa quantidade ideal. Isso é feito utilizando-se o conceito da mobilidade de Bray (1954), segundo o qual pode-se dizer que a quantidade de N requerido no solo é igual à quantidade de N nos tecidos (quando não há limitação na produtividade por outros nutrientes). Como consequência, assumindo-se valores genéricos para o conteúdo de N na cultura (no produto comercial) e eficiência de utilização do N mineral, então pode ser estabelecida uma relação entre produtividade e requerimento de N (Equação 14). No trabalho citado, o autor exemplifica essa relação para a cultura do trigo.

Equação 14: $N_r = Y \times N_g \times N_m$

em que

Y = produtividade, em kg ha^{-1} de grãos;
 N_r = N requerido, em kg ha^{-1} de N;
 N_g = teor de N no grão, em kg kg^{-1} ;
 N_m = eficiência do N mineral, em $\text{kg N disponível} / \text{kg grãos}$.

Como eventuais deficiências de P ou K e também condições ambientais sub-ótimas ($FC < 1$) reduzem a produtividade possível, haverá redução proporcional no requerimento de N e, assim, as quantidades calculadas devem ser proporcionalmente reduzidas:

Equação 15: $_{aj}N_r = N_r \times Y_P \times Y_K \times FC$

em que

$_{aj}N_r$ = requerimento de N ajustado pelas condições de disponibilidade de P, K e condições ambientais.

Assim, pode ser calculado o sub-componente Y_{Ni} :

Equação 16: $Y_{Ni} = N_i / _{aj}N_r$

Quando N_i é menor que $_{aj}N_r$, ou seja, o fornecimento de fertilizante nitrogenado é inferior ao requerimento da cultura, existe a possibilidade de resposta

ao N proveniente da mineralização durante o ciclo da cultura. O limite superior dessa resposta, quando expressa em termos do componente Y_N na produtividade, é dado por $1 - Y_{Ni}$, uma vez que apenas esses dois sub-componentes são considerados no cálculo do componente Y_N . A relação entre o N orgânico disponível (N_o) e o N orgânico requerido para completar a necessidade não suprida pelo N_i (N_{ro}) modula o grau de atendimento da complementação necessária. Dessa forma, o sub-componente Y_{No} , pode ser calculado:

Equação 17: $Y_{No} = (1 - Y_{Ni})(N_o/N_{ro})$

Na equação 17, o termo N_{ro} é a quantidade de N orgânico requerido para satisfazer a diferença entre o $a_j N_r$ e o N_i . Assim, o termo N_o é o único para o qual um valor real não pode ser medido diretamente. A proposta de Johnson (1991), nesse caso, é considerar dados históricos de produtividade de áreas não fertilizadas com N. Quando é utilizada uma meta de produtividade (Y_g) igual à média histórica dessas áreas (Y_h), o requerimento de N pela cultura é igual à disponibilidade de N proveniente da mineralização ($N_o = N_r$). Isso equivale a dizer que em sistemas não fertilizados um estado de equilíbrio é alcançado entre a disponibilidade de N proveniente da mineralização e a produtividade, desde que não existam outras limitações à produtividade pela deficiência de outros nutrientes. Para o autor, quando o sistema se afasta desse equilíbrio, ou seja, quando se estabelece, por exemplo, uma meta de produtividade maior do que a média histórica, a contribuição do N_o para o N_r é reduzida e essa redução é proporcional ao quadrado da relação Y_h/Y_g . Além disso, são levados em consideração outros princípios, como o fato da contribuição proveniente do N orgânico ser reduzida proporcionalmente à dose de N mineral aplicada e o efeito residual de aplicações dessas doses.

Como resultado, Johnson (1991) conseguiu estabelecer equações para estimar o N_o e um sistema que lhe permitiu realizar simulações com os três macronutrientes. Pelo menos no caso das culturas do trigo e trevo, conforme resultados relatados pelo autor, o modelo estimou respostas em produtividade muito semelhantes às aquelas observadas no campo.

Não obstante, o próprio autor reconhece que o modelo não contempla a análise da influência de fatores locais específicos que poderiam modificar a resposta ao P e K, tais como a textura do solo. Isso é válido tanto para o método de Raij & Cantarella (1996) quanto para o de Johnson (1991), uma vez que ambos baseiam-

se em resultados de estudos de calibração. Portanto, sua aplicação se limita àquelas culturas para as quais existem estudos de calibração confiáveis e compartilham com essa calibração o mesmo grau de incerteza. É importante notar que a calibração da análise de solo se baseia, quase sempre, em um número limitado de experimentos, realizados em pequeno número de locais e safras, a partir dos quais são derivadas médias para representar regiões agrícolas geralmente muito grandes. Assim, a maioria dos fatores de influência específica somente são considerados, no modelo, na mesma medida em que forem considerados na calibração realizada.

Para o método de Johnson (1991), existe uma dificuldade adicional de que as doses tabeladas (Quadro 4), tanto para o P quanto para o K, referem-se à aplicação a lanço, com incorporação. Seria necessário, portanto, estabelecer relações (índices ou algoritmos) que as transformassem em doses localizadas, o que adiciona mais incertezas ao modelo. O autor sugere, para o P, uma relação de 2:1 entre a dose a lanço e a localizada, mas reconhece que para algumas situações, como em solos muito pobres em P, as doses aplicadas no sulco de plantio podem apresentar eficiência bem maior que 2:1. Essa opinião é compartilhada por Novais & Smyth, (1999), que sugerem uma relação de 6:1 para solos tropicais com alto poder de adsorção de P. Para a cultura da soja, Santos (2002), sugeriu um fator de correção máximo de 4,2:1 para solos com alto poder de adsorção (baixo P remanescente), com um decréscimo linear, proporcional ao P remanescente do solo, até um valor mínimo de 1,8:1 para solos com baixo poder de adsorção.

Devem ser ressaltadas outras importantes comparações entre esses dois métodos. Na proposta de Johnson (1991), estima-se a possibilidade de redução na produtividade devida a diferentes graus de fornecimento da dose considerada ótima. Se forem aplicadas as doses ótimas de nutrientes, os fatores Y_N , Y_P e Y_K terão valores unitários e a produtividade será afetada apenas por outros eventuais fatores limitantes. O dimensionamento da influência da sub-utilização de fertilizantes se dá pela multiplicação da meta de produtividade pelos valores de Y_N , Y_P e Y_K em conjunto (Equação 11), o que é coerente com a fisiologia vegetal. No entanto, o modelo confia inteiramente na dose ótima tabelada, não contemplando a possibilidade de determinação da dose mais lucrativa em função de relações de preço entre o produto agrícola e os fertilizantes. No método proposto por Raij & Cantarella (1996), a resposta em produtividade é calculada de forma isolada para cada nutriente, mas a estimativa de uma curva de resposta permite a determinação da dose mais lucrativa de cada nutriente (Equação 6).

Embora Raij & Cantarella (1996) tenham provido uma fórmula para estimar a meta de produtividade baseada em resultados de análise de P disponível, deve-se considerar que apenas esse fator não é suficiente para estimativas confiáveis para todas as situações. Assim, pode-se dizer que os cálculos, em ambos os métodos, partem de uma meta de produtividade estipulada pelo usuário, o que dá margem a subjetivismo. Além do risco de permitir a utilização de metas irreais, outra consequência desse subjetivismo é tornar questionáveis os estudos que comparam as estimativas dos modelos com resultados de campo, pois a meta de produtividade, como uma variável de cálculo, poderia ser ajustada para produzir melhores estimativas.

3.2.2 Sistema 'QUEFTS' ("Quantitative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils")

Descrito por Janssen et al. (1990), esse sistema foi concebido como uma forma de "quantificar" a qualidade do solo em termos de suprimento de nutrientes para as culturas. Pretende-se substituir palavras qualitativas, como 'baixo', 'médio' e 'alto' por índices quantitativos, evitando-se, dessa forma, má interpretação e permitindo a comparação mais objetiva de solos diferentes. Especificamente, o sistema calcula a produtividade que poderia ser obtida em uma área, a partir de resultados analíticos comuns. Foi desenvolvido a partir de dados experimentais com a cultura do milho, mas esse sistema de cálculo pode, segundo os autores, ser aplicada a outras culturas. Encontram-se exemplos dessa utilização com a cultura do arroz (Wade et al., 1998, Wang et al., 2001, Regmi et al., 2002 e Haefele et al., 2003) e sorgo (Binder et al., 2002).

Descrevendo resumidamente o sistema QUEFTS, pode-se dizer que ele estima, a partir de equações empíricas, a produtividade possível, ou produtividade esperada, de lavouras de milho não adubadas, em solos em seu estado atual de fertilidade. Também pode ser utilizado para estimar a produtividade que pode ser atingida com a aplicação de N, P e K, via fertilizantes respectivos, e a lucratividade dessa aplicação e para estimativas da otimização de alocação de recursos entre nutrientes.

O sistema QUEFTS utiliza uma abordagem interessante de separação entre o suprimento potencial do nutriente e a sua absorção real (ou atual). Assume-se que a quantidade de um nutriente que a cultura absorve do solo não depende apenas da

quantidade daquele nutriente presente em forma disponível no solo, mas também da disponibilidade de outros nutrientes. O suprimento potencial é teoricamente descrito como a quantidade do nutriente que passa pela solução do solo durante o período de crescimento e desenvolvimento da cultura. Como essa quantidade não pode ser medida diretamente, adota-se a definição operacional, segundo a qual o suprimento potencial é a quantidade que é absorvida pela cultura quando o nutriente em questão é o principal e, se possível, o único fator limitante, estando todos os demais fatores em níveis ótimos. Essa redefinição permite que o suprimento potencial de um dado nutriente possa ser obtido indiretamente pela determinação da quantidade absorvida pela cultura em experimentos de fertilização nos quais todos os fatores, exceto o nutriente medido, sejam não limitantes. Obviamente, outros fatores que não o suprimento de nutrientes, como disponibilidade de água e estrutura do solo, devem estar também otimizados.

Dessa forma, a quantidade absorvida, obtida em experimentos assim delineados, foi relacionada com características analíticas do solo, tendo sido possível estabelecer equações empíricas, portanto, somente aplicáveis para condições semelhantes àsquelas onde foram conduzidos os experimentos (Quadro 7)⁸.

Quadro 7. Equações para o cálculo do suprimento potencial de N (SPN), P (SPP) e K (SPK). Resultados de amostras da camada de 0 a 20cm.

Equação
$SPN = fN \times 6,8 \times C_{org}$
$SPP = fP \times 0,35 \times C_{org} + 0,5 \times P_{Olsen}$
$SPK = (fK \times 400 \times K_{troc}) / (2 + 0,9 \times C_{org})$
Fator de correção pelo pH
$fN = 0,25 \times (pH - 3)$
$fP = 1 - 0,5 \times (pH - 6)$
$fK = 0,625 \times (3,4 - 0,4 \times pH)$
SPN, SPP, SPK expressos em $kg\ ha^{-1}$ de N, P e K, respectivamente, carbono orgânico (C_{org}) em $g\ kg^{-1}$, P disponível (P_{Olsen}) em $mg\ kg^{-1}$ e K trocável (K_{troc}) em $mmol_c\ kg^{-1}$ Fonte: Janssen et al. (1990)

⁸ Os dados utilizados pelos autores para elaboração do sistema são oriundos de experimentos conduzidos no Quênia, em regiões com diferentes condições climáticas e de solo, e no Suriname.

A estimativa da produtividade é feita de acordo com a absorção real (atual), razão pela qual o sistema necessita estabelecer relações entre esta e a absorção potencial estimada pelas equações do quadro 7. A derivação das equações usadas no cálculo da absorção atual é complicada do ponto de vista matemático e não será demonstrada aqui. No entanto, essa derivação se baseia em princípios simples da resposta das plantas aos nutrientes e uma discussão sobre esses princípios é conveniente.

Na figura 8 é mostrada a relação teórica entre absorção e suprimento de um nutriente (N). Podem ser distinguidas três situações:

-situação A (à esquerda do Ponto I): o suprimento de N é muito baixo. A cultura vai absorver completamente o N disponível e um aumento no suprimento de N resulta em acréscimo na quantidade absorvida e na produção de biomassa, de modo que se mantém a concentração de N nos tecidos. Portanto, pode-se dizer que há uma concentração mínima de N na planta e que esta permanece inalterada até o Ponto I;

- situação C (à direita do Ponto II): o suprimento de N é maior do que a capacidade da cultura em absorver o nutriente. O aumento no suprimento de N não resulta em acréscimo na quantidade absorvida porque um outro fator está limitando o crescimento da cultura, que pode ser o suprimento de outro nutriente ou outros fatores. A partir desse ponto, pode-se dizer, então, que a concentração de N atingiu um valor máximo.

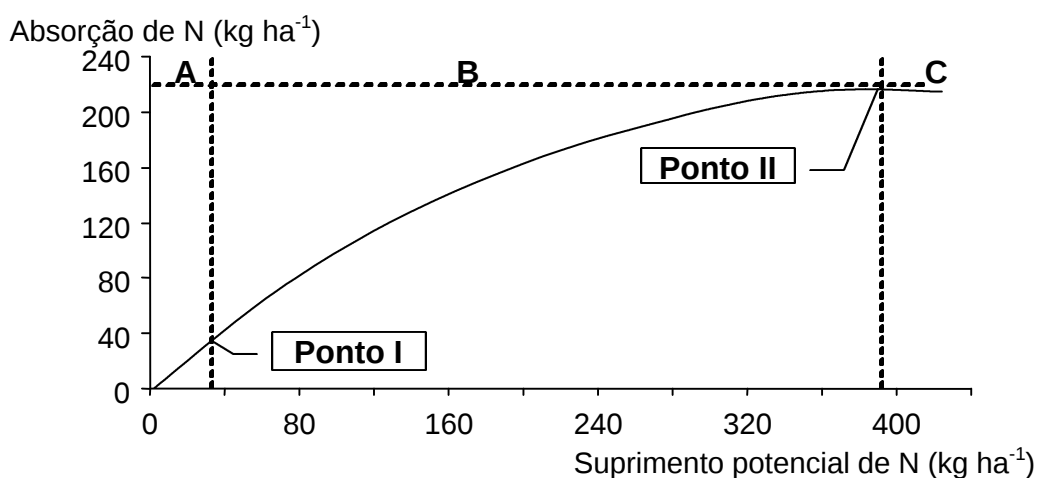


Figura 8: Suprimento real (atual) de N em função do suprimento potencial de N para um dado suprimento potencial fixo de P.
Fonte: Janssen et al. (1990).

Segundo Janssen et al. (1990), até o Ponto I, a absorção de N é limitada pela fonte ('source limited'), ou seja, a absorção atual de N é limitada somente pelo suprimento potencial de N. A partir do Ponto II a absorção é limitada pela capacidade de absorção ('sink limited'), ou seja, a absorção atual é determinada somente pela capacidade de crescimento da cultura, a qual pode estar sendo limitada por outros fatores. Na situação B (entre os pontos I e II) há uma gradual alteração na natureza da limitação. A posição dos pontos I e II é determinada pelo grau de interação entre os fatores que determinam os extremos da linha. Se não houvesse interação entre esses fatores, a transição entre I e II seria abrupta, como se assume no princípio conhecido como Lei do Mínimo, ou de Liebig, ou seja, a curva seria do tipo 'linear-plateau'.

O modelo quadrático da curva da figura 8 é oriundo da suposição de que há uma taxa decrescente constante de 1 para 0 entre os pontos I e II, ou seja, 1 representa a máxima limitação por N e 0 representa nenhuma limitação por N. A integral dessa função linear gera uma parábola, o que é necessário para a derivação matemática das relações entre suprimento potencial e absorção real, feitas por Janssen et al. (1990) (Quadro 8).

As outras suposições utilizadas nessa derivação são as seguintes⁹:

- para cada nutriente existe um conteúdo mínimo e máximo na planta;
- quando um nutriente está acumulado em seu valor máximo na planta, ele não exerce nenhum efeito limitante sobre o crescimento e vice-versa: quando ele não está limitando o crescimento é porque está no seu nível máximo. Como consequência, quando um nutriente é encontrado em seu valor máximo, assume-se que o crescimento está sendo limitado por outro fator (outro nutriente ou fator físico);
- quando um nutriente é encontrado em seu nível mínimo, somente ele está limitando o crescimento da planta e vice-versa: quando somente o nutriente é o fator

⁹ Deve ser notada a concordância entre esses princípios e as conclusões obtidas pela análise da Figura 3, no item 3.1.3, principalmente no que se refere ao valor fixo do EUN nos baixos níveis de produtividade. Essa convergência demonstra que essas conclusões estão solidamente calcadas em resultados experimentais, sendo fruto do trabalho conjunto dos autores, que pertencem à mesma instituição (Universidade de Wageningen, Países Baixos).

limitante, assume-se que ele está em seu nível mínimo. Segue-se que quando um nutriente é encontrado em seu nível mínimo, todos os outros estão em seu nível máximo (no caso do sistema QUEFTS, os outros são dois nutrientes, pois ele trabalha apenas com N, P e K). No entanto, não é válido assumir que quando todos os nutrientes, exceto um, estão em seu nível máximo, o remanescente esteja necessariamente em seu mínimo, pois pode haver outros fatores limitando o crescimento;

- quando um nutriente está em seu nível máximo, a absorção é regulada para estar de acordo com a taxa de crescimento da cultura, ou seja, outros fatores limitantes é que ditam a absorção real de nutrientes não-limitantes;

- quando um nutriente está em seu nível mínimo, a absorção não é influenciada pela taxa de crescimento, mas somente pelo suprimento.

Se houver disponibilidade de resultados experimentais que permitam conhecer os pontos I e II para cada par de nutrientes, pode ser construída a curva parabólica que descreve a situação B (Figura 8). Para cada nutriente será calculado, então, um par de valores de absorção atual (em função do suprimento dos outros dois nutrientes), sendo a mais baixa considerada para o cálculo da produtividade possível. Para relacionar a absorção atual com a produtividade, o sistema QUEFTS trabalha com duas situações: uma em que o nutriente está em nível máximo de acumulação e outra para o nível mínimo de acumulação (Figura 9). É estimada, então, uma faixa de possíveis produtividades de acordo com cada um dos três nutrientes e esses valores são combinados aos pares (N-P, N-K e P-K) para estimativa final da produtividade possível, sendo considerada como válida a menor estimativa.

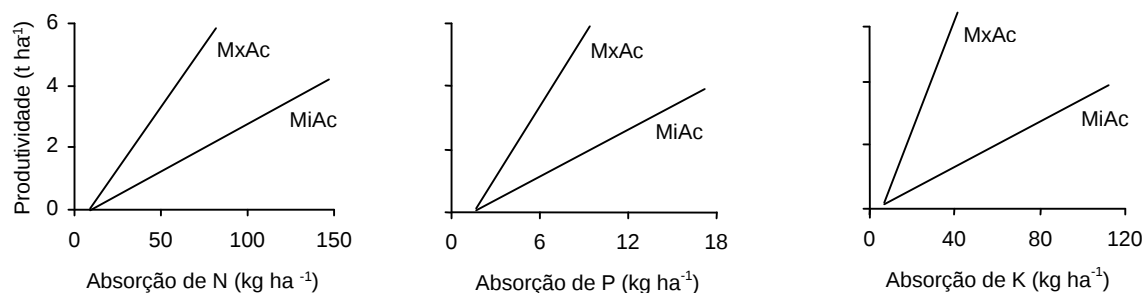


Figura 9. Relação entre absorção de N, P e K e produtividade de milho para condições de máxima acumulação (MxAc) e mínima acumulação (MiAc).

Fonte: Janssen et al. (1990)

Fica bem claro, portanto, que o sistema QUEFTS provê uma maneira de relacionar os resultados da análise do solo com a produtividade esperada, mas não foi projetado especificamente para realizar recomendações de adubação. A aplicação de fertilizantes é tratada, nesse sistema, como adições ao suprimento potencial do nutriente. No cálculo da quantidade adicionada são consideradas taxas de recuperação dos fertilizantes aplicados, as quais são calculadas a partir da diferença entre as quantidades absorvidas em parcelas que recebem uma pequena quantidade de nutriente na forma de fertilizante e em parcelas não adubadas.

Com o suprimento potencial dos nutrientes acrescidos pela aplicação de fertilizantes, calcula-se a produtividade esperada da mesma forma relatada anteriormente e, por diferença, obtém-se o efeito da aplicação dos fertilizantes, permitindo, assim, a análise econômica da adubação. O sistema pode, portanto, ser usado como uma ferramenta de simulação que permite estudar o efeito de diferentes doses, provendo bases técnicas e econômicas para decisões de manejo da fertilidade do solo.

Tendo sido desenvolvido para o propósito de avaliação da terra, o sistema QUEFTS pode utilizar, como características diagnósticas, resultados analíticos normalmente encontrados em levantamentos pedológicos, mas tais dados são, freqüentemente, disponíveis em uma escala incompatível para a finalidade de recomendações de adubação, que devem ser específicas para cada gleba. Para isso, equações específicas devem ser obtidas, o que equivale a dizer que o sistema deve ser calibrado para cada cultura e condição climática e de solo. São necessários resultados experimentais com a cultura em diferentes tipos de solos que são comuns na região alvo. Idealmente, segundo Janssen et al. (1990), para cada solo devem ser obtidos resultados experimentais em duplicata, a partir de um delineamento fatorial que considere três níveis de cada nutriente (dose zero, baixa e elevada) e, para cada experimento, devem ser anotadas as características do solo como aquelas constantes no quadro 7, produtividade de biomassa comercial, parte aérea e as concentrações de N, P e K. Os campos experimentais devem ser manejados de forma a garantir que apenas os nutrientes sejam os fatores limitantes, estando todos os demais fatores em níveis ótimos.

Sendo assim, nem sempre será possível a utilização de resultados experimentais já existentes e o custo de implantação de experimentos específicos para calibração do sistema é elevado, mesmo considerando-se apenas os três macronutrientes principais. Existem, portanto, sérias limitações ao emprego do

sistema para um grande número de culturas, visando à criação de um sistema genérico.

Apesar disso, o QUEFTS tem o mérito de apresentar uma maneira objetiva de se considerar a interação entre os nutrientes na determinação da produtividade possível. As equações que são utilizadas para tal foram derivadas a partir dos princípios anteriormente citados, que são solidamente embasados nos princípios de química do solo e nutrição vegetal, mas o aproveitamento dessas equações em outros sistemas apresenta a mesma limitação citada no parágrafo anterior, por requerer coeficientes empíricos, derivados de experimentos de campo (Quadro 8).

Como o sistema QUEFTS se baseia em resultados derivados de experimentos em áreas cujas limitações são apenas os nutrientes N, P e K, não foi provida nenhuma facilidade de cálculos para correção de problemas devidos ao excesso de acidez. O sistema tem como premissa que qualquer problema de excesso de acidez, toxidez por Al ou deficiência de Ca e, ou, Mg tenham sido sanados.

Quadro 8. Equações para o cálculo da absorção atual (SA = Suprimento Atual) do nutriente 1 como função do suprimento potencial (SP = Suprimento Potencial) dos nutrientes 1 e 2. SA₁₂ é o símbolo para suprimento atual do nutriente 1 em relação ao 2

Situação	Condição
A	$SP1 < r1 + (SP2 - r2)(a2/d1)$
C	$SP1 > r1 + (SP2 - r2)(2 \times d2/a1 - a2/d1)$
B	SP1 entre os extremos acima
Equação para SA₁₂	
A	$SA1_2 = SP1$
C	$SA1_2 = r1 + (SP2 - r2)(d2/a1)$
B	$SA1_2 = SP1 - (0,25(SP1 - r1 - (SP2 - r2)(a2/d1))^2 / (SP2 - r2)(d2/a1 - a2/d1))$
Nutriente	Valor das constantes para a cultura do milho
	a d r
N	30 70 5
P	200 600 0,4
K	30 120 2

Fonte: Janssen et al. (1990)

3.2.3 Sistema NuMaSS ('Nutrient Management Support System')

O sistema NuMaSS (Sistema de Apoio ao Manejo Nutricional) foi desenvolvido com o objetivo de prover suporte às decisões sobre manejo da fertilidade do solo em regiões de agricultura de menor nível tecnológico, onde há

menor disponibilidade de informações de pesquisa e de profissionais especialistas. Descrito por Osmond et al. (2002), trata-se de um projeto financiado pelo '*Soil Management Collaborative Research Project*' da agência '*U.S. Agency for International Development*'.

Segundo os autores, as interações entre os nutrientes na determinação da produtividade das culturas são de alta complexidade e necessitam ser tratados simultaneamente. Somando-se a isso, a existência de numerosas combinações de culturas, condições sociais, políticas, econômicas e disponibilidade de recursos, considera-se que os conhecimentos requeridos para diagnósticos apropriados e prescrição das melhores alternativas de manejo excedem a capacidade de qualquer especialista humano, havendo, portanto, a necessidade de apoio de sistema informatizado projetado para considerar, simultaneamente, o maior número possível de variáveis envolvidas.

As ferramentas de diagnóstico e suporte às decisões de manejo do sistema NuMaSS estão configuradas em um programa de computador distribuído gratuitamente¹⁰. Constam nele três módulos de manejo da fertilidade do solo (sistemas de suporte às decisões sobre acidez, P e N), além de um módulo de análises econômicas. As informações necessárias para execução do sistema, de forma integrada, são dependentes das informações providas em cada módulo, razão pela qual o usuário deve seguir um roteiro completo para obter laudos com as recomendações de manejo. Foi construído um banco de dados que provê valores padrões para quase todas as variáveis dos cálculos, mas em alguns casos, como o teor de argila ou a classe textural da gleba, a informação deve ser fornecida pelo usuário.

O módulo relativo aos problemas de acidez foi delineado para calcular a dose de calcário para correção da toxidez por Al e, ou, deficiências de Ca e Mg. A abordagem principal é a comparação dessas características da gleba com valores tolerados (Al) ou requeridos (Ca e Mg) pela espécie que se pretende cultivar e as doses de corretivos são calculadas para correção de eventuais desvios. Esse método é semelhante ao adotado pela Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais (Alvarez & Ribeiro, 1999) na sua concepção, mas apresenta peculiaridades que o diferenciam deste, uma vez que foi projetado para ser de

¹⁰ O endereço na Internet é: <http://www.soil.ncsu.edu/scripts/numass/download.php>

utilização mais genérica, visando atender a regiões agrícolas em várias partes do globo.

As doses de N são calculadas para suprir a diferença entre a necessidade da cultura e o que é fornecido pelo solo e por adições provenientes de eventuais aplicações de adubos orgânicos e dos resíduos da cultura anterior, sendo considerado um índice de eficiência do fertilizante aplicado (Equação 18).

Equação 18¹¹: $N_{\text{fert}} = \{(Y_r \times N_c) - [(N_{\text{soil}}) + (N_r \times C_r) + (N_m \times C_m)]\} / E_f$

em que

N_{fert} = necessidade de fertilizante nitrogenado;

Y_r = objetivo de produtividade (matéria seca), tanto vegetativa quanto reprodutiva;

N_c = concentração de N na matéria seca, tanto vegetativa quanto reprodutiva;

N_{soil} = N mineralizado da matéria orgânica do solo e oriundo de fixação atmosférica de N_2 ;

N_r = N mineralizado de adubos verdes e restos culturais;

C_r = proporção do N_r que é absorvido pela cultura;

N_m = N mineralizado de adubos orgânicos adicionados ao solo;

C_m = proporção do N_m que é absorvido pela cultura;

E_f = eficiência do fertilizante nitrogenado.

O cálculo do N requerido pela cultura leva em consideração a produtividade de produto comercial e de parte aérea (Equação 19). Se o usuário não possui tais informações, valores padrões constantes no banco de dados do sistema podem ser utilizados.

Equação 19 : $(Y_r \times N_{cr}) = (Y_g \times N_g) + (Y_s \times N_s)$

em que

$(Y_r \times N_{cr})$ = definidos acima;

Y_g e Y_s = respectivamente produtividade de parte aérea e parte reprodutiva;

N_g e N_s = respectivamente os teores de N na parte aérea e reprodutiva, em dag kg^{-1} .

¹¹ A fórmula que consta na publicação consultada (Osmond et al., 2002) não contém a chave envolvendo o numerador da expressão. Nessa publicação, a fórmula é descrita como: $N_{\text{fert}} = (Y_r \times N_c) - [(N_{\text{soil}}) + (N_r \times C_r) + (N_m \times C_m)]/E_f$. Se for utilizada dessa forma, apenas a segunda parte da expressão será dividida por E_f , mas o correto é dividir o resultado final da diferença entre a necessidade da cultura e a quantidade obtida por outras fontes que não o fertilizante. Acredita-se que seja um erro de digitação, pois no texto do artigo os autores se referem ao cálculo como ele está descrito na equação 18.

Existem quatro opções para a determinação do N proveniente do solo (N_{soil}), cuja escolha se baseia na disponibilidade de informações a serem supridas. Osmond et al. (2002) consideram como mais exatas as opções que utilizam informações sobre o tipo de solo e histórico de utilização da área, que podem ser obtidas no banco de dados do sistema ou fornecidas pelo usuário. Os índices padrões fornecidos pelo banco de dados do sistema se baseiam em vários resultados experimentais consultados pelos autores. A opção considerada menos exata é aquela em que N_{soil} é estimado pela mineralização do N da matéria orgânica do solo. A taxa de mineralização padrão adotada é de 2 % ao ano, multiplicada pela proporção dos meses de duração do ciclo da cultura. Para construção dos índices padrões considerou-se, como regra geral, que a capacidade de fornecimento de N pelo solo na região pode ser estimada pelo N absorvido pelas culturas em parcelas não adubadas. Não está explícito no trabalho de Osmond et al. (2002), se foi adotado o princípio descrito por Janssen et al. (1990), segundo o qual somente há o aproveitamento de todo o nutriente potencialmente disponível se os demais nutrientes e fatores de produção estiverem em níveis ótimos.

O método de cálculo do N proveniente do solo pela mineralização da matéria orgânica é utilizado pelo sistema NuMaSS se as informações de tipo de solo e histórico da área não forem supridas pelo usuário. Com esse método, pressupõe-se uma taxa de mineralização mensal constante durante todo o ano, o que não é adequado, pois como a mineralização depende de atividade microbiana, ela será mais intensa nos meses de maior disponibilidade de água e maiores temperaturas. Uma taxa de mineralização mensal constante é adotada também por outros autores, como Wolf et al. (1989) e Osmond & Riha (1996), embora ambos tenham utilizado uma taxa de cerca de 4 % ao ano. No entanto, Osmond & Riha (1996) reconheceram que essa estimativa de mineralização de N do solo foi a variável que causou maior inexatidão nos resultados dos modelos testados por eles e sugerem que a principal causa não foi a taxa de mineralização considerada, mas a não contabilização de possíveis perdas durante o período não ocupado pela cultura. Essa conclusão é improcedente, uma vez que os modelos testados ponderavam a mineralização pelo número de meses de ocupação do terreno.

Segundo Hansen & Jensen (1995), a pressuposição de que a taxa de decomposição da matéria orgânica do solo é influenciada por fatores ambientais é comum em modelos de todas as categorias ou tipos. A decomposição de cada 'pool' de substratos orgânicos pode ser modelada por equações que descrevem a cinética

'Monod', de 'primeira ordem' (Equação 20) ou de 'ordem zero' (Equação 21), sendo as duas últimas as mais comuns.

Equação 20: $TX_{\text{decomp}} = k_1 \times S_i$

em que

TX_{decomp} = taxa de decomposição;

k_1 = constante de primeira ordem (afetada por fatores ambientais);

S_i = tamanho do 'pool' i.

Equação 21: $TX_{\text{decomp}} = k_0$

em que

k_0 = constante de ordem zero (afetada por fatores ambientais);

Verifica-se que, na cinética de 'primeira ordem', a taxa de mineralização é afetada pelo tamanho do substrato, o que não acontece na cinética de 'ordem zero', que é aquela utilizada pelo sistema NuMaSS. Segundo Hansen & Jensen (1995), em ambas cinéticas está implícita também a pressuposição de que os microrganismos tenham um potencial ilimitado para decompor o substrato orgânico. Ambas as pressuposições podem ser criticadas, mas, segundo Hansen & Jensen (1995), as cinéticas de 'ordem zero' e de 'primeira ordem' são capazes de apresentar boas aproximações em um número limitado de aplicações. O efeito da temperatura é considerado, na maioria dos modelos, pelo valor Q_{10} . Como exemplo, pode ser citado o modelo CENTURY (Hilinski, 2001), no qual a taxa de decomposição mensal é modulada por um fator que considera a temperatura e umidade do solo:

Equação 22: $DEFAC = \text{teff}(1) + \text{teff}(2) \times e^{(\text{teff}(3) \times \text{stemp})}$

em que

DEFAC = fator que modula a decomposição potencial, baseado na temperatura e umidade do solo;

teff(1), teff(2) e teff(3) = respectivamente, o intercepto, inclinação e coeficiente Q_{10} ;

stemp = média mensal da temperatura do solo.

O modelo de crescimento de culturas conhecido como CENTURY utiliza o sub-modelo para a dinâmica da matéria orgânica do solo desenvolvido por Parton et

al. (1988), o qual simula a dinâmica de C, N, P e S em ciclos anuais, numa escala de tempo de séculos e até milênios.

Outros exemplos podem ser encontrados em Smyth et al. (1996) e Quemada et al. (1997).

A consideração de um fator que determina a proporção do N mineralizado de adubos verdes, resíduos e adubos orgânicos que será absorvido pela cultura (C_r e C_m , na equação 18) é adequada, pois é correta a suposição de que nem todo o N contido nesses materiais estará disponível durante o ciclo de crescimento. Primeiramente, há a necessidade de ocorrer a mineralização do material e, além disso, nem todo o N liberado será aproveitado devido aos processos de perdas de N no solo (volatilização, desnitrificação, etc.). No entanto, o valor desses fatores não está disponível para alteração pelo usuário do sistema, obrigando-o a aceitar cálculos com valores padrões. Verifica-se, pela análise do conteúdo do banco de dados do sistema, que ele trabalha com um valor padrão de 39 %, ou seja, considera-se que cerca de 2/5 do N contido em materiais orgânicos adicionados ao solo será absorvido pela cultura durante o ciclo. É questionável a aplicação de uma proporção única para materiais com diferentes composições, principalmente no que se refere à relação C/N e ao estado de fragmentação do material, fatores importantes na determinação da taxa de decomposição do material orgânico fresco adicionado ao solo (Janssen, 1984 e Khier, 1989). Na cultura do café, por exemplo, Prezotti (2001) utiliza taxas de decomposição dos resíduos que variam de 10% (caules) a 100% (folhas), no primeiro ano. Taxas entre 26 e 100% são utilizadas para estimar a liberação de nutrientes de resíduos culturais da bananeira (Oliveira, 2002). Como esses fatores (C_r e C_m) têm grande influência no cálculo da dose de fertilizante nitrogenado, seria mais adequado um maior refinamento, especificando valores diferentes para diferentes materiais, e permitir ao usuário a alteração do valor tabelado.

O índice de eficiência do fertilizante nitrogenado pode ser especificado pelo usuário, mas há uma lista de valores padrões que variam entre 20 e 80 %, dependendo da cultura e variedade, tipo de solo e região.

O módulo relativo ao P é considerado pelos autores do sistema como sendo o que está em estágio mais inicial de desenvolvimento, necessitando ainda de considerar diversos fatores para expandir sua capacidade de diagnóstico e recomendações para maior gama de tipos de solos e culturas.

O objetivo é diagnosticar se o suprimento de P do solo é suficiente para a meta de produtividade da cultura intencionada e, caso o suprimento de P pelo solo não seja suficiente, prever a quantidade de fertilizante fosfatado para corrigir a deficiência. A diagnose da capacidade de suprimento do solo é baseada em informações que incluem histórico de cultivos, observação de sintomas de deficiências, análise de solo e de tecido vegetal e até mesmo a presença de plantas indicadoras do 'status' de P do solo.

O algoritmo presentemente utilizado necessita de três coeficientes e duas determinações analíticas. Os coeficientes são a proporção do P adicionado ao solo que permanece disponível, o nível crítico de P extraível, ou seja, o teor acima do qual não se esperam respostas em produtividade à adição de fertilizantes, e a taxa de declínio do P extraível com o tempo. Esses três coeficientes são dependentes de características do solo e das plantas, o que indica que o sistema não deve estar trabalhando com valores fixos ou faixa de valores, mas sim com modelos empíricos que integram essas variáveis, mas não foi possível obter os algoritmos utilizados pelo sistema, o que permitiria discussões mais detalhadas.

As análises requeridas são os teores de P extraível e de argila do solo. O sistema aceita resultados provenientes de análises de solo realizadas com os extratores 'Bray 1', 'Mehlich 1', 'Mehlich 3', 'Olsen' e 'Truog', mas as equações internas estão configuradas para trabalhar com um extrator, não especificado na literatura consultada, deduzindo-se, assim, que são utilizadas internamente funções para conversão de teores, o que introduz grande potencial para incertezas (Novais & Smyth, 1999).

O NuMaSS possui também um módulo de análise econômica, pelo qual as previsões sobre cada nutriente são integradas para determinação de doses de máxima eficiência econômica da aplicação de recursos no manejo da fertilidade do solo. A resposta a cada nutriente é avaliada segundo uma função de resposta 'linear-plateau'. Assumem-se, portanto, respostas de acordo com a Lei do Mínimo ou de Liebig para cada nutriente.

3.3. Sistema 'FERTICALC'

O Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa vem desenvolvendo trabalhos com algumas culturas, com o intuito de prover um novo enfoque para as recomendações de adubação. Baseando-se em um ponto de vista

alternativo, sugerido por Novais & Smyth (1999), busca-se a substituição do empirismo das tabelas por sistemas de cálculos que possuam maior base científica, permitindo uma aplicação mais abrangente, sem restrições regionalistas artificiais, e que sejam abertos a crescente aperfeiçoamento devido à lógica de sua constituição.

Foram sugeridos sistemas de cálculos, genericamente denominados de 'FERTICALC', para as seguintes culturas: milho (Carvalho, 2000), arroz (Raffaeli, 2000), tomate (Mello, 2000), café (Prezotti et al., 2000 e Prezotti, 2001), cana-de-açúcar (Freire, 2001), soja (Santos, 2002), banana (Oliveira, 2002) e coco (Rosa, 2002). No texto que se segue, a referência 'FERTICALC' deve ser entendida como referência a esses trabalhos.

Cada um desses trabalhos visou apresentar uma proposição de cálculo de recomendações de adubação baseado em um balanço de massa dos nutrientes, de acordo com a proposição original de Novais & Smyth (1999), para o nutriente P, a qual baseia-se em um conjunto de idéias básicas, a saber:

- objetiva-se a substituição das atuais tabelas, por se considerar que este sistema de recomendações tem pequena perspectiva de evolução e cuja utilidade se mostra cada vez menor em um cenário que exige recomendações mais refinadas, devido à maior competitividade do agronegócio e estreitamento das margens de lucratividade;
- o cultivo deve considerar sempre a sustentabilidade do uso do solo, o que depende da otimização de sua produção por unidade de fertilizante adicionado;
- a fertilização de um solo deve ser decidida por meio de um balanço entre o que ele tem de nutrientes disponíveis e os exportados na forma de produtos, mesmo que numa primeira fase não se considerem outras perdas oriundas do cultivo. Se for negativo, esse balanço deverá ser anulado pela adição de fertilizantes. Se for positivo, a fertilização pode não fazer sentido como fator de aumento de produtividade, mas ainda pode ser um instrumento de manutenção da sustentabilidade;
- como a saída de nutrientes é calculada levando-se em consideração a produtividade da cultura, se essa aumentar, a demanda também será maior, tornando o cultivo mais dependente dos fertilizantes. Portanto, o sistema deve recomendar doses variáveis com a produtividade.

O sistema FERTICALC foi descrito, em termos genéricos, por Tomé Junior & Novais (2000) como se segue:

$$\text{Equação 23: } \text{Nut}_{\text{fert}} = [(\text{Nut}_{\text{planta}} - \text{Nut}_{\text{solo}}) + \text{Nut}_{\text{sust}}] / \text{Ef}$$

em que

Nut_{fert} = nutriente a ser adicionado na forma de fertilizantes;

$\text{Nut}_{\text{planta}}$ = demanda do nutriente pela cultura;

Nut_{solo} = oferta do nutriente pelo solo;

Nut_{sust} = demanda do nutriente para manter a sustentabilidade da exploração agrícola;

Ef = índice de eficiência de absorção, pela cultura, do nutriente aplicado como fertilizante.

A lógica envolvida nesse modelo genérico de recomendação de adubação é conceitualmente simples: as doses recomendadas de nutrientes dos fertilizantes seriam a diferença entre as quantidades necessárias para as plantas e o que é fornecido naturalmente pelo solo, considerando que devem continuar a existir teores mínimos dos nutrientes no solo, evitando o esgotamento de sua capacidade de sustentação de futuros cultivos, além da necessária correção de acordo com o aproveitamento do nutriente aplicado na forma de fertilizante. Entretanto, essa aparente simplicidade esconde grandes dificuldades metodológicas. Com o desdobramento de cada componente da equação 23, surgem necessidades de dados e métodos de cálculos que não estão prontamente disponíveis, uma vez que o enfoque da pesquisa realizada até o momento não foi no sentido de gerar essas informações e os métodos analíticos geram informações estáticas e pontuais. A análise de tecidos de plantas, por exemplo, reflete a situação no momento da coleta das amostras, não informando sobre a dinâmica do acúmulo de nutrientes. Além disso, os índices gerados pela análise de solo de rotina pouco informam, de forma direta, sobre o comportamento, e, portanto, eficiência, que se pode esperar dos fertilizantes aplicados, o que é necessário para estimar o 'Ef', fator de correção relacionado à recuperação pelas plantas dos nutrientes fornecidos. Poder-se-ia, ainda, somar a já clássica questão do que vem a ser a sustentabilidade.

Nos trabalhos relativos a cada cultura, já citados, os autores procuraram sanar essas dificuldades, sugerindo soluções que mesmo não sendo definitivas, em face da falta de modelos e dados específicos, podem ser consideradas como uma primeira aproximação que poderá ser aprimorada.

Uma análise crítica dessas soluções deve ser feita para estabelecer as diretrizes que permitirão a construção de um sistema genérico, que se propõe no presente trabalho.

3.3.1 Proposta original de Novais & Smyth (1999)

Embora tenha feito sugestões apenas para P, o sistema de cálculos proposto por Novais & Smyth (1999) serviu de modelo para os sistemas elaborados para as demais culturas e nutrientes (FERTICALC), razão pela qual justifica-se uma discussão mais detalhada das sugestões apresentadas por esses autores, abordando seus dois mais importantes aspectos, que são o cálculo da demanda e do suprimento de P.

3.3.1.1. Cálculo da demanda de P pela cultura

Para estimar a demanda de P pela cultura, foi proposto utilizar o índice de eficiência de utilização de P (EUP¹²) médio, definido como a quantidade de biomassa produzida por unidade de nutriente, no caso, o P, absorvido pela espécie a ser cultivada, tanto da parte comercial quanto da parte vegetativa. O EUP médio é igual ao inverso da concentração de P na parte da planta e é expresso em kg kg^{-1} . Como a estimativa de produtividade se refere ao produto comercial, utiliza-se uma relação entre biomassa da parte vegetativa e biomassa do produto comercial, ou índice de colheita, para se obter a primeira a partir da segunda. Há, entretanto, a indicação de que equações mais complexas que estabeleçam essa relação para diversas culturas deverão substituir essas relações numéricas, futuramente. Essa sugestão concorda com a discussão referente à figura 3 (página 15), quando comentou-se que a produtividade de grãos como função da quantidade de nutriente absorvido é linear apenas na porção inicial da curva, mas se torna curvilínea, de forma diferenciada conforme a época de cultivo, nos níveis mais elevados de absorção.

¹² No texto de Novais & Smyth (1999) é utilizada a denominação 'coeficiente de utilização de P' (CUP). No texto do presente trabalho será utilizada a denominação 'eficiência de utilização de P' (EUP), que expressa melhor a idéia desse índice.

De qualquer forma, uma vez calculadas as biomassas de produto comercial e parte aérea restante, bastaria dividir cada valor de biomassa pelos seus respectivos EUP's médios para se obter a quantidade de P imobilizada em cada parte. No entanto, argumenta-se que a eficiência da planta em utilizar o P para produzir biomassa varia entre solos, podendo essa eficiência ser relacionada com o Fator Capacidade de P (FCP)¹³ do solo. Por isso, antes do cálculo das quantidades, torna-se necessário corrigir o EUP médio, que inclui resultados oriundos de diversos tipos de solos, o que é feito por meio de equações que relacionam o nível crítico de P na planta com o P remanescente, utilizado como medida de FCP.

Esses cálculos de correção do EUP médio são exemplificados com a cultura da soja e as equações para essa cultura foram obtidas no trabalho de Muniz et al. (1987), mas a relação pode ser generalizada quando se possui uma faixa de variação do nível crítico para a cultura, supostamente cobrindo uma larga amplitude de valores de P remanescente, ou seja, oriundos de cultivos em variados tipos de solos, e admitindo-se uma relação linear entre o nível crítico e P remanescente. Sendo assim, a relação genérica seria:

$$\text{Equação 24}^{14}: \text{NC}_{\text{foliar}} = \text{NC}_{\text{inf}} + (\text{NC}_{\text{sup}} - \text{NC}_{\text{inf}}) / 60 \times \text{P}_{\text{rem60}}$$

em que

$\text{NC}_{\text{foliar}}$ = nível crítico foliar em função do valor de P remanescente do solo;
 NC_{inf} e NC_{sup} = respectivamente, limite inferior e superior da faixa de nível crítico para a cultura;
 P_{rem60} = P remanescente do solo, em mg L^{-1} de P.

¹³ Também chamada de Capacidade Tampão de P, essa característica do solo diz respeito à maior ou menor facilidade com que o P da solução do solo (Fator Intensidade, I) passa para a reserva de P lábil do solo (Fator Quantidade, Q) e vice-versa. O FCP é, portanto, a relação entre as variações dos dois fatores (Q/I) e os três em conjunto (I, Q e Q/I) definem a dinâmica do P no sistema solo-planta (Novais & Smyth, 1999). O FCP deve ser considerado para interpretação dos teores de P no solo quando fornecidos por extratores sensíveis a essa característica do solo, como o extrator Mehlich 1. Anteriormente se utilizava o teor de argila do solo como uma estimativa de seu FCP. Atualmente, a determinação do 'P remanescente' (P_{rem}) é utilizada para isso (Ribeiro et al., 1999).

¹⁴ Os cálculos exemplificados por Novais & Smyth (1999) utilizam a determinação de P remanescente a partir de uma solução com concentração inicial de 30 mg L^{-1} de P (P_{rem30}), que era o método preconizado no trabalho de Muniz et al. (1987), consultado pelos autores. Atualmente, essa determinação é realizada a partir de uma concentração inicial de 60 mg L^{-1} de P (Alvarez et al., 2000). Contudo, o conceito de relacionamento linear entre NC e P remanescente continua válido e, por isso, na equação 24 consta o P_{rem60} .

Com os extremos da faixa de nível crítico, calcula-se o $NC_{\text{foliar médio}}$, cujo inverso, fornece o EUP médio. A relação entre NC_{foliar} , calculado pela equação 24, e $NC_{\text{foliar médio}}$ é aplicada para correção do EUP médio, obtendo-se o EUP corrigido:

$$\text{Equação 25: EUP corrigido} = \text{EUP médio} \times (NC_{\text{foliar médio}}/NC_{\text{foliar}})$$

O mesmo processo é feito para o EUP médio da parte comercial.

Com a utilização do nível crítico foliar para estimar os nutrientes acumulados em toda a parte aérea, assume-se uma concentração homogênea dos nutrientes em todos os tecidos. Embora essa pressuposição não seja a mais adequada, pode ser utilizada como uma primeira aproximação na falta de dados mais detalhados.

O sistema proposto por Novais & Smyth (1999) considera uma taxa de recuperação de P pela planta, visando transformar a quantidade de P imobilizada no produto comercial e na parte não comercial, calculada conforme já descrito, em quantidade de P a ser aplicada ao solo. A taxa de recuperação é considerada também como sendo função do P remanescente:

$$\text{Equação 26: TxRec} = 2,2424 + 0,264162 \times P_{\text{rem60}}$$

em que

TxRec = taxa de recuperação do P do solo pela planta, em %;

P_{rem60} = P remanescente¹⁵, em mg L^{-1} de P.

A lógica dessa equação provém da constatação experimental de que a facilidade de absorção, pelas plantas, do P da reserva lábil é negativamente relacionada com a energia de ligação de fosfato e com o FCP do solo (Muniz et al., 1987). A taxa de recuperação é diretamente proporcional ao P remanescente porque esse índice é inversamente relacionado ao FCP.

A quantidade de P para atender a uma determinada demanda, como função da produtividade, será obtida pela divisão da quantidade de P imobilizada na cultura pela taxa de recuperação. Para culturas olerícolas, Novais & Smyth (1999) assumem

¹⁵ A equação original refere-se ao P_{rem30} , com um coeficiente angular de 0,46833. Considerando-se as mesmas taxas de recuperação para os dois extremos da escala de P_{rem30} e P_{rem60} , iguais a 2,2424 % (para o mínimo de zero) e 16,2923 % (para os valores máximos de 30 e 60, respectivamente) altera-se apenas o coeficiente angular da equação, que cai pela metade. As transformações na Equação 26 e Equação 27 visam facilitar as comparações com o sistema desenvolvido para outras culturas, que utilizaram o P_{rem60} .

que a taxa de recuperação é, em média, 2,6 vezes menor que para culturas anuais. Para culturas desse tipo, portanto, antes do cálculo da quantidade a aplicar ao solo, a taxa de recuperação é dividida por esse valor, o que corresponde a aumentar 2,6 vezes a quantidade de P a aplicar em comparação com culturas anuais, para um mesmo solo. Esse valor foi obtido pela comparação das doses recomendadas para os dois tipos de culturas nas tabelas em uso no estado de Minas Gerais (CFSEMG, 1989). Os autores reconheceram que esse procedimento é apenas uma aproximação que deveria ser revisto em futuras versões do sistema.

Para culturas perenes, propõe-se a distinção das três situações comuns a essas culturas: a fase de produção de mudas, fase de implantação e fase de manutenção. Para a produção de mudas, não há necessidade de se considerar a demanda pela planta. O sistema parte de uma informação básica sobre a dose necessária de P para a produção de mudas em viveiros, que é de $1,4 \text{ kg m}^{-3}$ de P_2O_5 , caso o solo apresentasse 'zero' de P disponível. Essa dose é ajustada de acordo com o P remanescente do solo e transformada em teor (mg dm^{-3} de P) para posterior comparação com o teor já existente no solo e conversão de eventuais deficiências em kg m^{-3} de P_2O_5 . Para a fase de implantação, o sistema parte da dose de P necessária para a produção de mudas, corrigindo-a para o tamanho da cova a ser utilizada.

Como o sistema proposto para culturas perenes é baseado na experiência dos autores com florestas de eucalipto, propõe-se, para a fase de manutenção, a consideração da produtividade da floresta no final do ciclo e a proporcionalidade entre a produtividade anual de madeira (IMA = incremento médio anual) e a idade da floresta. Essa produtividade anual de madeira define a necessidade de fertilização fosfatada anual. Para culturas perenes, com colheitas anuais, como café e fruteiras em geral, a produtividade anual de frutos é que define essa necessidade, mas naquelas que possuem uma fase de crescimento sem produção, o acúmulo anual de biomassa na parte aérea será considerada nessa fase.

Para culturas perenes na fase de manutenção, utiliza-se a relação linear, já comentada, entre taxa de recuperação e P remanescente. Admite-se uma taxa de recuperação de 50 % para solos arenosos e 30 % para solos argilosos, com valores intermediários proporcionais ao P remanescente:

Equação 27: $RE = 30 + 20 / 60 \times P_{rem60}$

em que

RE = taxa de recuperação do extrator, em %;

P_{rem60} = P remanescente, em $mg\ dm^{-3}$;

20 = diferença entre os dois extremos (50 - 30).

3.3.1.2. Fornecimento de P pelo solo

A proposição de Novais & Smyth (1999) não é dimensionar, de forma direta, a quantidade de P disponível que existe no solo. Em vez disso, a demanda de P pela cultura é transformada em um nível crítico (NC) de P no solo. Considera-se, portanto, que esse NC seria aquele teor que deveria existir no solo para que a planta absorva todo o P necessário para dada produtividade. Verifica-se, assim, uma concordância com o conceito de Bray (1954), que estabelece que para os nutrientes de baixa mobilidade no solo, como o P, o teor do nutriente no solo, e não a quantidade, é que determina o nível de produtividade que pode ser alcançado (item 3.2.1.2, página 24).

A diferença entre esse NC “ideal” e o teor atualmente existente no solo, se positiva, é transformada em quantidade de P a aplicar como fertilizante fosfatado.

Para converter a quantidade demandada pela cultura em NC “ideal” do nutriente no solo, utiliza-se a relação entre o P recuperado pelo extrator e a quantidade de P aplicado como fertilizante. O cálculo sugerido por Novais & Smyth (1999) propõe relações de recuperação do extrator para Mehlich 1 e a Resina trocadora de ânions (RTA), por serem ambos utilizados no Brasil. Como o extrator Mehlich 1 é sensível a FCP e a medida de FCP é o P remanescente, foi proposto, para esse extrator, a utilização da seguinte relação:

Equação 28¹⁶: $TxRecExt_{Mehlich\ 1} = 0,0339 + 0,001546 \times P_{rem60}$

em que

$TxRecExt_{Mehlich\ 1}$ = taxa de recuperação do extrator Mehlich 1, na unidade $mg\ dm^{-3}$ de P / $kg\ ha^{-1}$ de P;

P_{rem60} = P remanescente, em $mg\ L^{-1}$ de P.

¹⁶ A mesma transformação para P_{rem60} , utilizada na Equação 26, foi utilizada também nessa equação. Portanto, o coeficiente angular da Equação 28 corresponde à metade daquele na equação publicada por Novais & Smyth (1999).

Para a RTA, sugeriu-se uma equação que estabelece a relação entre P extraído pela RTA e P aplicado como fertilizante:

$$\text{Equação 29: } Y = 2,9512 + 0,1314 X$$

em que

Y = P extraído pela RTA, em mg dm^{-3} de P;

X = quantidade de P aplicada, em kg ha^{-1} de P.

Para o extrator Mehlich 1 é calculada a $\text{TxRecExt}_{\text{Mehlich}}$ pela qual se multiplica a quantidade de P necessária pela cultura. Para a RTA, a quantidade de P necessária para a cultura é aplicada diretamente na equação 29. Obtém-se, em ambos os casos, o NC_{Ext} que é comparado ao teor atual do solo.

O mesmo processo, com as mesmas equações, é sugerido tanto para culturas anuais quanto olerícolas e perenes no estágio de manutenção, mas os autores atentam para o fato de que deverão ser obtidas relações específicas para cada cultura.

A quantidade de P a aplicar ao solo, calculada por esse método, corresponde a uma dose de P que será distribuída homogeneamente na superfície do solo, em área total e incorporada até 20 cm de profundidade. Quando é necessário estipular doses a serem aplicadas localizadamente, no sulco de plantio ou covas, os autores recomendam dividir a dose calculada por seis, mas acrescentam que esse valor é apenas uma aproximação inicial e que a relação entre as quantidades de P em área total e localizado ainda deverá ser modelada adequadamente. Uma tentativa de modelagem é apresentada no trabalho de Santos (2002) com a cultura da soja.

3.3.2 Características do Sistema FERTICALC proposto para diferentes culturas

Como já mencionado nos objetivos deste trabalho, o estudo das soluções adotadas para cada cultura torna-se necessário para verificar a possibilidade de seu aproveitamento na composição de um sistema de cálculos unificado e genérico.

Verificou-se que as propostas de cálculos para cada cultura seguiram as recomendações gerais de Novais & Smyth (1999), mas foram feitas algumas adaptações que serão discutidas a seguir.

3.3.2.1. Demanda de nutrientes

Em todos os trabalhos relacionados ao FERTICALC, os autores procuraram o maior detalhamento possível para estimar os nutrientes demandados pela cultura, mas a inclusão de todas as partes da planta nesse cálculo nem sempre foi possível devido à falta de dados específicos, como é o caso de raízes. É muito provável que se repita essa limitação quando forem pesquisados parâmetros de cálculos para culturas ainda não contempladas. Por essa razão, no sistema genérico devem constar todos os possíveis componentes, ou partes da planta, mas deverá ser permitido ao usuário desabilitar a inclusão daqueles componentes cujos parâmetros não sejam conhecidos com razoável grau de certeza.

A busca desse detalhamento é natural, pelo fato de cada cultura ter suas peculiaridades em termos de componentes estruturais considerados para o cálculo da demanda de nutrientes, ou seja, as partes da planta que são exportadas e as que permanecem na área como fonte de nutrientes para futuros cultivos. Os órgãos exportados variam dependendo da cultura, como grãos, frutos, colmos, folhas, etc.. Em algumas culturas é exportada toda a parte aérea, envolvendo mais de um órgão da planta, como é o caso da alface, alfafa e outras. Na cultura da banana, a produtividade é computada em quantidade de frutos, mas há outros órgãos que podem ser exportados juntamente com os frutos, como a ráquis e o ingaço. Outros exemplos são a cultura da seringueira, em que é exportado um produto, o látex, e não um órgão, e do coco, em que pode ser exportado todo o fruto, que contém também a água-de-coco, relativamente rica em nutrientes, ou exportada apenas a copra¹⁷.

Portanto, não é viável a utilização do termo 'produto comercial' em um sistema genérico de cálculos. Da mesma forma, é inviável a utilização do termo 'órgão exportado', sendo necessário estabelecer uma terminologia que seja adequada para todos os casos. Para a estruturação do sistema genérico, será adotada a denominação 'componente' para designar as partes da planta de interesse no cálculo da demanda nutricional, agrupando-os em 'componente exportado' (CE) e 'demais componentes' (DC). Isso torna possível estabelecer uma

¹⁷ Copra é o albúmen desidratado.

relação do tipo $DC = f(CE)$, que permite estimar a produção de matéria seca de DC em função de CE, o qual deverá corresponder à maneira usual de exprimir a produtividade da cultura. Esse cuidado é muito importante para a construção do sistema, pois permite reduzir a quantidade de informações solicitadas ao usuário, uma vez que fornecendo-se apenas a produtividade almejada (CE), o sistema sugere estimativas para DC. Para culturas em que não há exportação, como é o caso de frutíferas no período de formação, apenas DC é computado para a demanda nutricional nesse período. O sistema deverá sugerir, então, a variação de matéria seca (MS) de DC no período considerado (mais detalhes no item 4.1).

Para a cultura do tomate, Mello (2000) optou por utilizar proporções específicas que relacionam o teor do nutriente no fruto com o teor na planta, para cada nutriente e tipo de cultivar. Assim, após calcular a quantidade de nutrientes demandada pela produção comercial de frutos, relacionando o teor médio do nutriente nos frutos com a produtividade, estima-se a quantidade de nutrientes na planta toda por meio dessas relações. Por exemplo, a quantidade de N demandada pela planta toda é calculada multiplicando-se a quantidade demandada pela produção comercial de frutos pelo fator 1,74.

Opção semelhante foi adotada por Rosa (2002) com a cultura do coco. Para o período de crescimento sem produção, o autor estimou equações que relacionam o teor de nutrientes com a idade em meses. Para o período de produção, considera-se a produtividade de copra por planta e os teores de nutrientes neste componente, além de um adicional para formação do estipe. Nas simulações realizadas com seu sistema, Rosa (2002) não apresentou cálculos para a exportação de frutos '*in natura*', caso em que as quantidades de nutrientes exportados são maiores em relação à produção de copra.

Para essas culturas, portanto, será necessário consultar a literatura referida pelos autores visando buscar dados para estruturar o cálculo do sistema genérico de acordo com o padrão sugerido, $DC = f(CE)$, ou então criar algoritmos de cálculos específicos para essas culturas. Essa segunda opção não é desejável, pois interpõe cálculos diferentes da lógica geral do sistema, dificultando seu entendimento e complicando sua configuração, manutenção e atualização.

Para as demais culturas, verificou-se que embora cálculos específicos tenham sido propostos, é possível estabelecer relações gerais entre DC e CE (Quadro 9). Prezotti (2001) apresentou, para a cultura do café, equações que permitem estimar a variação de biomassa (biomassa) de DC tanto no período de crescimento, sem

produção, quanto na fase produtiva, com a particularidade de que essas equações levam em consideração a população de plantas da lavoura cafeeira, o que é muito conveniente já que existe grande variabilidade no espaçamento utilizado nos plantios de café no Brasil. Além disso, esse autor apresentou índices para a partição dessa biomassa estimada entre os vários componentes, como folhas, galhos, caule e raízes, o que permite utilizar teores de nutrientes específicos para cada um desses órgãos, aumentando a exatidão do cálculo da demanda por nutrientes.

Quadro 9. Equações para estimativa de matéria seca de Demais Componentes (DC) em função da matéria seca ou biomassa do Componente Exportado (CE), obtidas diretamente ou desenvolvidas com dados dos trabalhos referenciados.

Cultura	Equação	Observações
Milho (Carvalho, 2000)	$DC = CE (1,371783 - 0,000037 CE)$	CE em $kg\ ha^{-1}$ de matéria seca de grãos e DC em $kg\ ha^{-1}$ de matéria seca
Arroz (Raffaelli, 2000)	$DC = 883,25 + 0,8803 \times CE$	CE em $kg\ ha^{-1}$ de grãos, com 13 % de umidade, e DC em $kg\ ha^{-1}$ de matéria seca
Soja (Santos, 2002)	$DC = (-43.400,9 + 14.936,7 \text{ Log } CE) - CE$	CE em $kg\ ha^{-1}$ de grãos, com 13 % de umidade, e DC em $kg\ ha^{-1}$ de matéria seca
Cana-de-açúcar (Freire, 2001)	$DC = 0,64 \times CE$	CE e DC na mesma unidade. Considera-se um teor de umidade médio nos colmos de $0,75\ kg\ kg^{-1}$
Banana (Oliveira, 2002)		CE e DC em $kg\ ha^{-1}$ (peso do tecido seco) e produtividade em $t\ ha^{-1}$ de matéria fresca (frutos+ráquis+ingaco)
Grupo AAA	$DC = 1,73 CE$	$CE = 0,1795 \times \text{Produtividade}$
Grupo AAB	$DC = 2,41 CE$	$CE = 0,23 \times \text{Produtividade}$

Não obstante esse esforço em procurar relações específicas para essas culturas, que poderão ser usadas em aplicativos também específicos, o 'índice de colheita' (IC) será, em geral, a informação mais facilmente encontrada. Definido como a proporção entre a produção econômica e a produção biológica total, o IC pode, então, ser expresso como $IC = CE / (DC+CE)$ e, portanto, a relação geral $DC = f(CE)$, no sistema genérico, será $DC = (CE / IC) - CE$.

Para o cálculo da demanda de nutrientes pela cultura, observam-se variações nas opções adotadas. Para a cultura da cana-de-açúcar, Freire (2001) utilizou equações, específicas por nutriente, que relacionam diretamente a produtividade e a quantidade de nutrientes demandada. Embora esse autor tenha apresentado

também equações para estimativa do EUN¹⁸ em função da produtividade, estas ficaram sem utilidade no seu sistema devido à opção de calcular a demanda como função direta da produtividade, mas poderão ser aproveitadas no sistema genérico.

Nas demais culturas, utilizou-se o teor dos nutrientes ou o EUN, obtido pelo inverso do teor, para calcular a demanda de nutrientes pelos componentes considerados. Nas culturas do milho, arroz, café, soja, banana e coco trabalhou-se com valores médios para cada nutriente em cada componente. Apenas na cultura do tomate e soja, para os nutrientes N e K, os dados experimentais consultados demonstraram variabilidade consistente entre EUN e produtividade, tendo sido ajustadas equações para essa relação.

Conforme já discutido (item 3.1.3, página 13), é reconhecida a variabilidade do EUN com a produtividade, pelo menos quando grãos são o componente exportado, como em culturas anuais, com tendência para um valor fixo em baixas produtividades e redução desse valor em elevadas. A relação entre EUN e produtividade, nesse caso, seria do tipo 'linear-plateau'. Mas deve ser notado que nos estudos citados por Keulen (1986), foi considerado o nutriente absorvido por toda a planta, integralizando, portanto, todos os componentes, e a produtividade de grãos. Assim, essa tendência não pode sempre ser assumida como verdadeira quando se considera o EUN de cada componente separadamente. Espera-se maior variabilidade dos teores de nutrientes com a produtividade em componentes de maior atividade metabólica, como folhas, grãos e frutos, do que em componentes estruturais, como ramos e caules, mais lenhosos.

Assim, considera-se justificável a utilização de valores médios para o EUN quando os componentes são considerados separadamente, conforme adotado pela maioria dos trabalhos relacionados ao FERTICALC. Não obstante, todos os autores se referiram à necessidade de pesquisas mais amplas para constituição de banco de dados de valores médios por componente, seja pela busca na literatura ou por experimentos especialmente designados para tal.

A correção do EUN em função do FCP do solo, conforme sugerido por Novais & Smyth (1999) para o P, não foi adotada nos cálculos sugeridos para as culturas do coco e banana. Não foram apresentadas razões para tal, mas supõe-se que os

¹⁸ Como esses trabalhos seguiram, em linhas gerais, as orientações de Novais & Smyth (1999), o índice CUP (coeficiente de utilização de P), utilizado por estes, foi generalizado para 'coeficiente de utilização biológica' (CUB). No texto do presente trabalho, o CUP foi substituído por EUP (ver nota de rodapé número 12). Assim, pelas mesmas razões, o CUB será substituído por 'eficiência de utilização do nutriente' (EUN).

autores tenham considerado os dados disponíveis como insuficientes para configurar essa correção ou que o caráter perene das mesmas dilui tal efeito, no maior tempo. Nas demais culturas, a correção foi adotada, além de para o P, também para S e Zn. Considera-se essa correção valiosa para melhoria da exatidão das recomendações, uma vez que ela está amparada em sólida base experimental e teórica. A não configuração dessa correção com o argumento de falta de resultados experimentais adequados não se justifica, uma vez que ela pode ser estimada tendo-se os limites da faixa de nível crítico do componente e admitindo-se uma relação linear entre o EUN e FCP, conforme demonstrado na equação 24 (página 54).

A transformação da quantidade de nutrientes imobilizados na planta em quantidade a ser disponibilizada no solo, considerando-se uma taxa de recuperação dos nutrientes do solo pela planta, foi utilizada em todos os estudos relacionados ao FERTICALC. Para as culturas do tomate, soja, banana e coco, os autores optaram por utilizar uma taxa de recuperação fixa para cada nutriente, exceto para P na cultura da soja e P e S na cultura do coco, para os quais estima-se a taxa de recuperação em função do P remanescente, e K na soja, em que se utilizou uma taxa variável conforme a quantidade de K acumulada. Nas culturas da cana-de-açúcar e arroz, estima-se também a taxa de recuperação como variável da quantidade acumulada¹⁹. Para os nutrientes P, S e Zn, na cana-de-açúcar, utilizou-se uma regressão múltipla que considera o P remanescente além da quantidade imobilizada. Para o café foi necessário considerar a população de plantas para estimar essa taxa.

As diferenças nas opções dos autores dos trabalhos do FERTICALC, com relação ao EUN e à taxa de recuperação dos nutrientes do solo pela planta, são devidas principalmente à diferença na disponibilidade de dados experimentais para cada cultura, como já comentado. Como a taxa de recuperação, por exemplo, envolve a comparação da quantidade acumulada pela cultura com a quantidade adicionada ao solo, pressupõe-se a utilização de resultados experimentais de resposta das plantas à adubação em que tenha sido analisado o conteúdo de nutrientes na cultura, o que é relativamente raro na literatura. Mas a impressão resultante desses estudos, que compreendem culturas representativas de cada

¹⁹ Na verdade, a taxa de recuperação do nutriente pela planta é considerada como variável em função da quantidade de nutriente aplicada ao solo. No entanto, essa quantidade ainda não é conhecida nessa etapa de cálculo, pois é esse o objetivo do sistema. Assim, em substituição, nos trabalhos relacionados ao FERTICALC, utilizou-se a quantidade de nutrientes acumulada na cultura.

grupo, como olerícolas, anuais e perenes, é que pelo menos valores aproximados iniciais podem ser conseguidos para todas as culturas. Para aquelas em que não forem encontrados dados específicos, culturas similares do mesmo grupo poderão servir como fonte de informação.

Ambos os parâmetros de cálculo da demanda pela cultura, EUN e taxa de recuperação, são muito importantes por interferirem significativamente nos resultados. Portanto, a busca de valores padrões iniciais para esses parâmetros de cálculo, bem como eventuais generalizações entre culturas por similaridade, deverão ser feitas com muito critério.

Recomenda-se, para configuração de um sistema genérico, que para tais parâmetros de alta sensibilidade, seja fornecida uma faixa de valores possíveis e não um valor padrão único, além de indicações das situações que podem afetar esses valores para mais ou para menos. A EUN, por exemplo, pode ser influenciada por vários outros fatores, além da produtividade, e essa variabilidade seguramente é diferente entre os componentes da planta. Em outras palavras, deve ser indicado o 'escopo da variabilidade'²⁰, deixando ao usuário a possibilidade de estabelecer suas opções para os cálculos. Essa deve ser uma diretriz básica para o desenvolvimento de todo o sistema, pois estabelece a possibilidade de o usuário realizar simulações, testando diferentes cenários, antes de optar por uma recomendação definitiva. Dessa forma, o sistema servirá como suporte às decisões do usuário, em vez de fornecer decisões prontas²¹.

No entanto, como não havia essa diretriz para os trabalhos relacionados ao FERTICALC, não houve o cuidado de levantar informações para delimitar o 'escopo da variabilidade' desses parâmetros, mas acredita-se que elas possam ser estabelecidas com a ajuda de mais estudos e consulta a especialistas com as culturas.

²⁰ Entende-se por 'escopo da variabilidade' os limites inferior e superior de uma faixa de valores possíveis, além de algumas situações de campo que interferem na variação desses valores. Não se trata, portanto, de estabelecer relações matemáticas para obtenção de um valor específico para cada situação, mas sim de listar situações que 'puxam' os valores para mais ou para menos, dentro da faixa pré-estabelecida.

²¹ Além de permitir simulações, a configuração do sistema dessa maneira traz a vantagem adicional de transferir para o usuário a responsabilidade técnica por suas recomendações.

3.3.2.2. Fornecimento de nutrientes pelo solo

Em todos os sistemas propostos para as culturas foram seguidas as sugestões de cálculos de Novais & Smyth (1999), que consistem em transformar a quantidade de nutrientes demandada pela cultura em um nível crítico do nutriente no solo (NC ideal) e verificar a diferença entre NC ideal e o teor atual do nutriente no solo. Eventuais diferenças positivas são transformadas em quantidade de nutriente a aplicar, depois de descontar possíveis contribuições provenientes de resíduos da cultura anterior, adubos orgânicos, dentre outras, dependendo de cada cultura.

Para todos os nutrientes, com exceção do N, utilizaram-se relações entre o nutriente recuperado pelo extrator e o aplicado ao solo, chamada de 'taxa de recuperação do extrator', para a conversão de quantidades em NC e vice-versa. Para P, S e Zn, a taxa de recuperação do extrator Mehlich 1 em todos os trabalhos, e, em alguns casos, também para RTA, foi estimada como função da capacidade tampão de P solo.

Para os demais nutrientes, considerou-se um valor fixo ou a taxa foi estimada a partir do ajuste de uma função linear entre a quantidade recuperada pelo extrator e a aplicada ao solo, sendo a declividade da equação ajustada utilizada como a taxa de recuperação.

Em todos os trabalhos, os autores chamaram atenção para o fato de haver necessidade de aprimoramento desse parâmetro de cálculo, pelo fato de os resultados experimentais consultados para obtê-lo serem pouco representativos ou por serem oriundos de experimentos que não foram delineados especificamente para essa finalidade. A mesma recomendação feita anteriormente, sobre o estabelecimento de um 'escopo de variabilidade', pode ser aplicada nesse caso, pois também esse é um parâmetro de cálculo muito sensível.

Não se observa consenso com relação aos cálculos do fornecimento de N pelo solo. O solo não foi considerado como fonte de N nos sistemas sugeridos para as culturas do tomate, banana, coco e soja. No caso da cultura da soja não há problema quanto a essa opção, uma vez que essa cultura não é fertilizada com N, assumindo-se que a fixação biológica de N_2 satisfaz à necessidade das plantas. Entretanto, é questionável, para as demais culturas, pois embora a contribuição do N proveniente da matéria orgânica do solo possa ser pequena em relação à necessidade da cultura, não é desprezível, sendo importante contabilizá-la quando se pretende estabelecer o balanço de nutrientes no sistema agrícola.

Nos sistemas propostos para a cultura da cana-de-açúcar, milho e café utilizou-se o modelo de Stanford & Smith (1972), adaptado segundo informações de Parentoni et al. (1988) e Vasconcelos et al. (1999):

Equação 30: $N_{\min} = N_{\text{potMin}} \times e^{kt}$

em que

$N_{\min}$ = N mineralizável durante o período de tempo t ;

N_{potMin} = quantidade de N potencialmente mineralizável no volume de solo explorado pelas raízes. Para obtenção de N_{potMin} considera-se a profundidade de exploração pelas raízes, o teor de matéria orgânica do solo e seu teor de N, além da taxa anual de mineralização do N;

t = tempo, em semanas, que a cultura absorve N;

k = taxa semanal de mineralização da matéria orgânica.

Embora esse modelo tenha sido considerado satisfatório nos sistemas propostos para as culturas da cana-de-açúcar, milho e café, é necessário ressaltar que foi utilizado de forma conceitualmente errada. No tempo zero, como $e^0 = 1$, o resultado do cálculo corresponde ao valor estimado para o N potencialmente mineralizável. Assume-se, portanto, que no tempo zero, a cultura tem disponível todo o N potencialmente mineralizável do solo e que essa quantidade é ainda acrescida exponencialmente com o tempo (Figura 10A). É provável que esse engano tenha sido provocado pela inversão do sinal do coeficiente k , mas mesmo que se utilizasse o sinal negativo, fazendo com que a equação descreva corretamente o fenômeno (Figura 10B), não é correto considerar que todo o N potencialmente mineralizável esteja disponível para a cultura no tempo zero. O N disponibilizado para a cultura, após um certo tempo (T_1), é a quantidade mineralizada entre T_0 e T_1 .

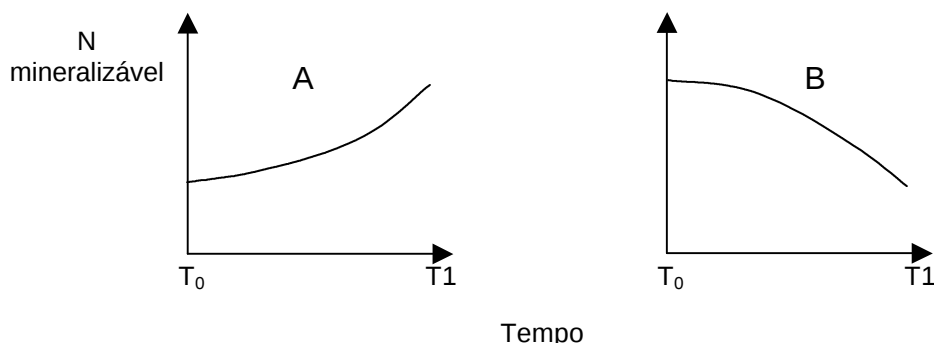


Figura 10: (A): representação gráfica da equação 30; (B) descrição correta do processo.

Ainda que se utilize corretamente o modelo da equação 30, são recomendáveis mais estudos para seu aprimoramento. Carvalho (2000) e Prezotti

(2001) assumiram que 1,48 % do N total do solo é potencialmente mineralizável, sem especificar em que período, e uma taxa de mineralização semanal, valor de k, de 0,042, enquanto Freire (2001) assumiu que 6,34 % do N total é mineralizável e valores de k variando entre 0,039 e 0,074. Portanto, é questionável se valores únicos para esses parâmetros podem ser considerados adequados para toda a diversidade de ambientes do país.

3.3.2.3. Sustentabilidade

Ao se falar em análise da sustentabilidade de sistemas agrícolas, deve-se ter em mente que essa análise envolve muito mais do que a manutenção da fertilidade do solo, mas apenas esse aspecto foi considerado no sistema FERTICALC até então e, também, é o único que está sendo considerado no sistema genérico aqui proposto. Risco de erosão, rentabilidade da exploração agrícola e consumo interno de produtos são exemplos de outros importantes fatores que devem ser considerados e questões como essas deverão ser alvo de futuros estudos visando o aprimoramento do sistema.

Nos trabalhos relacionados ao FERTICALC, procurou-se garantir a manutenção da fertilidade evitando-se que o cálculo da oferta de nutrientes pelo solo considerasse toda a sua reserva de nutrientes em forma “lábil” ou trocável. Utilizaram-se termos como ‘manutenção de uma reserva técnica’, ‘teor mínimo’ ou ‘demanda de segurança’, na tentativa de definir propostas para evitar a exaustão dos nutrientes do solo em longo prazo. Para café, Prezotti (2001) recomendou a manutenção de um teor mínimo do nutriente no solo relacionado com uma produtividade mínima especificada pelo usuário. O mesmo foi adotado por Santos (2002) na cultura da soja, e Rosa (2002) para a cultura do coco, mas neste último é opcional a adição de uma dose suplementar de nutrientes visando à manutenção de uma produtividade mínima no próximo ano. Em arroz irrigado, Raffaeli (2000) recomendou a adição de uma dose suplementar de P, equivalente à exportação deste nutriente pelos grãos. Freire (2001) recomendou que as doses dos nutrientes aplicados ao solo para satisfazer as demandas da cana-de-açúcar deveriam ser acrescidas de doses suplementares baseadas nas quantidades de nutrientes exportados. Opção semelhante foi adotada por Oliveira (2002) na cultura da banana.

Como esses sistemas, no entanto, não provêm métodos para relacionar os resultados da análise de solo com uma estimativa da ‘produtividade esperada’,

pode-se dizer que essas opções adotadas para garantir a manutenção da fertilidade, baseadas em teor mínimo ou produtividade mínima, levam a doses suplementares arbitrárias, com a circunstância agravante de tais doses suplementares não terem sido avaliadas do ponto de vista econômico, nesses trabalhos.

Como, então, deve ser abordada a questão da sustentabilidade no sistema genérico de cálculos? Embora exista pouco consenso sobre como se definir sustentabilidade da exploração agrícola, mesmo se apenas o aspecto da fertilidade do solo é abordado, pode-se dizer que o tempo, usualmente em longos períodos, é um fator comum em todas as tentativas de definição (Great Plains, 2003). Também se considera indispensável a utilização de modelos para se estimar a performance do sistema de forma a prever seu comportamento em longo prazo (Matthews, 2002). É nesse ponto que ocorre a falta de consenso, isto é, na modelagem da performance dos sistemas biológicos, ambientais e sócio-econômicos. Alguns dos aspectos que contribuem para essa falta de consenso são discutidos a seguir.

Como estão envolvidos longos períodos de tempo, o ideal seria basear essa modelagem em experimentos de longo prazo, mas esses, no entanto, são raros, por serem custosos, e, além disso, seus resultados são específicos para as condições nas quais foram obtidos, podendo ser úteis apenas para fornecerem diretrizes, mas não parâmetros de cálculo diretamente utilizáveis em outras condições. Assim, os modelos utilizados para previsões do comportamento de sistemas agrícolas, em geral, são baseados em observações obtidas em curtos períodos, a partir das quais se fazem suposições de tendências para o longo prazo. Deve-se ter em mente a impossibilidade de validação dessas suposições em longo prazo, devido à já comentada deficiência de informações desse tipo, as quais serviriam para confrontar as predições dos modelos. Não se podendo dimensionar o grau de incerteza associado às previsões de um modelo, sua confiabilidade como instrumento preditivo torna-se uma questão subjetiva, dificultando, assim, sua aceitação consensual.

Outro fator negativo é a especificidade dos modelos. Segundo Matthews (2002), freqüentemente se observa a tendência, entre os pesquisadores que trabalham com modelagem, de se concentrar exclusivamente em uma determinada cultura. Os modelos assim desenvolvidos, por isso, não são acoplados entre si e não integram o sistema agrícola como um todo. No entanto, a exploração agrícola se caracteriza por múltiplas explorações, consorciadas ou sucessivas, e sendo um sistema complexo, envolve inúmeras variáveis. Há, portanto, o risco de variáveis

importantes não serem consideradas ou a sua influência ser subestimada. O oposto também pode acontecer, ou seja, variáveis importantes apenas em um tipo de exploração, mas de influência restrita no contexto do sistema, serem indevidamente generalizadas. Esses riscos também ocorrem com a utilização de modelos empíricos, sem a necessária e adequada calibração, ou seja, quando modelos são utilizados em condições diferentes daquelas em que foram concebidos.

Outro aspecto que deve ser considerado na modelagem em longo prazo é que há o risco de que variáveis cuja influência se manifeste apenas após longos períodos não sejam detectadas em experimentos de curta duração.

Qualquer que seja a fonte de equívocos, em um prazo muito longo, mesmo os pequenos desvios são potencializados pela sua repetição nos cálculos. Conforme comentado por Matthews (2002), o longo prazo de análise também aumenta a probabilidade de ocorrência de fatores imprevistos, os quais, em geral, são externos aos sistemas analisados, tais como variações nas relações de preços de produtos e insumos, nas políticas governamentais, alterações de padrões tecnológicos, dentre outros.

Por tais razões, o excesso de confiança nas previsões de qualquer modelo, em longo prazo, pode ser desastroso. Esse receio, em última análise, pode ser considerado a principal causa da falta de consenso na definição da sustentabilidade.

Talvez a solução desse impasse provenha do reconhecimento de que a sustentabilidade, afinal, não pode ser definida, nem medida, por não ser uma quantidade, mas um estado dinâmico. E, por ser dinâmico, nunca se poderá dizer que um sistema 'é' absolutamente insustentável ou absolutamente sustentável. Pode-se, no entanto, afirmar que 'está' insustentável, ou sustentável, se, em longo prazo, se mantiver a mesma tendência de comportamento observada do momento da análise.

Segue-se, dessas considerações, que duas providências são indispensáveis quando há preocupação com a sustentabilidade em sistemas agrícolas, pelo menos quando a manutenção da fertilidade é o ponto focal: em primeiro lugar, alguma forma de monitoramento da tendência do sistema deve ser implementada, considerando pelo menos as variáveis conhecidas mais importantes e, em segundo, implementar mecanismos de correção de eventuais tendências à não sustentabilidade, de forma a guiar essa tendência para a sustentabilidade, dentro de limites considerados aceitáveis dos pontos de vista técnico e econômico.

As duas providências são indissolúveis, uma vez que a detecção de uma tendência negativa implicará a adoção de medidas corretivas que, por sua vez, deverão ter seus efeitos monitorados.

Por monitoramento se entende o registro de séries temporais de informações capazes de permitir a análise da tendência, ou seja, medidas de variáveis locais, tais como resultados de análises de solo, por períodos que compreendem várias safras ou ciclos²².

Deve ser ressaltado que a correção aqui referida é a da tendência à não sustentabilidade e não a correção total de um estado de não sustentabilidade, o que, em termos de adubação de culturas, faz muita diferença. Em outras palavras, providências para recuperação de sistemas degradados são muito mais intensas e requerem muito mais recursos que providências para corrigir eventuais tendências negativas.

Em sistemas agrícolas, deve ser considerada também a questão da escala, uma vez que é comum, na agricultura, a exploração, em uma mesma propriedade, de diferentes áreas com diferentes culturas. Pode acontecer de uma eventual tendência à não sustentabilidade, observada para uma determinada área, ser compensada pela tendência oposta de outra área e o sistema como um todo se apresentar sustentável.

Para atender à moldura aqui sugerida, no sistema genérico, a estrutura de armazenamento de dados relativos aos produtores rurais deve contemplar a possibilidade de anotação de múltiplas propriedades para cada produtor e, principalmente, de múltiplas glebas para cada propriedade. Cada gleba, portanto, será a menor entidade de informação e para cada gleba deverão ser anotadas, ao longo do tempo, as informações necessárias para acompanhar a tendência da fertilidade do solo. Resultados de análise de solo obviamente já fazem parte dessa estrutura por serem necessários nas recomendações de adubação. A informação da data de realização da análise torna-se, portanto, um dado muito relevante. Além disso, é imperativo que a estrutura de dados seja projetada de modo a contemplar a

²² Segundo Muller et al. (1993), uma sucessão cronológica sempre envolve vários componentes, podendo ser identificados componentes cíclicos, sazonais, irregulares, além da tendência propriamente dita. A importância de cada um desses componentes depende da variável que está sendo medida. Uma boa ferramenta de identificação de tendências é a 'média móvel', que é aquela calculada sobre um número especificado de pontos da série cronológica. Quando se introduz um novo dado, descarta-se o valor mais antigo, dando-se lugar à nova introdução:
 $MM_{s,t} = (Y_t + Y_{t-1} + Y_{t-2} + \dots + Y_{t-s+1}) / s$, em que 't' é o período (mês, por exemplo) e 's' é a amplitude do período para a média móvel. Porém, seja qual for o método de análise, verifica-se ser indispensável o registro de informações ao longo do tempo.

anotação de 'eventos' de entrada e saída de nutrientes. Para cada uma das glebas cadastradas poderão ser anotados 'eventos aditivos', que se constituem de aplicações de fertilizantes químicos, de corretivos, de fertilizantes orgânicos e restos vegetais, quando forem, esses dois últimos, de proveniência externa à gleba, e 'eventos subtrativos', que são as exportações de produtos comerciais, colheita para uso próprio, queimadas e perdas por erosão. Esses eventos deverão obrigatoriamente ser anotados por nutriente e com informação cronológica, ou seja, a data de ocorrência. A totalização dos eventos aditivos e subtrativos poderá, então, ser feita dentro do período desejado, sempre superior a um ano, e se constituirá na avaliação da tendência da sustentabilidade do nutriente no sistema agrícola, no período considerado.

Em um primeiro momento, a informação da tendência da sustentabilidade relativa a um nutriente, quando apresentada ao usuário do sistema, poderá ser utilizada, por esse, subjetivamente, para nortear adaptações nas recomendações futuras, de forma a tanger a sustentabilidade na direção correta. Sugere-se, entretanto, que sejam feitos estudos para criar recursos de decisão mais objetivos, tal como um sistema de pontuação para a tendência de sustentabilidade, cujos escores sirvam de moduladores quantitativos para as recomendações de adubação, crescendo-as ou reduzindo-as proporcionalmente ao grau negativo ou positivo, respectivamente, da tendência observada na sustentabilidade. Um ponto de partida interessante para tais estudos é a classificação do balanço de nutrientes adotada no método NUTMON de estudo da sustentabilidade de sistemas agrícolas tropicais (Nutmon, 2002), que considera o estoque atual de nutrientes e a tendência de depleção desses estoques (Quadro 10).

Uma vez que várias glebas compõem uma propriedade, essa poderá se constituir em um segundo nível de análise da sustentabilidade, pela consolidação das informações de suas glebas. Se as propriedades, por sua vez, fazem parte de uma mesma região agrícola, esta pode constituir-se em um outro nível de análise e assim por diante. Com a anotação de informações sobre a localização geográfica, latitude e longitude, para cada gleba, que é a entidade mínima de informação, a análise de quaisquer dos níveis mais abrangentes poderá ser facilmente realizada

com a ajuda de sistemas de informações geográficas (SIG)²³. Um ponto crítico para se atingir a todas essas possibilidades é o correto delineamento da estrutura de dados.

Quadro 10. Classificação do balanço de nutrientes do solo de acordo com seu estoque no solo, adotada no método NUTMON

Taxa de depleção do nutriente	Estoque do nutriente do solo				
	Muito pequeno	Pequeno	Moderado	Grande	Muito grande
Muito baixa	3	2	1	0	0
Baixa	4	3	2	1	0
Moderada	5	4	3	2	1
Alta	6	5	4	3	2
Muito alta	6	6	5	4	3

Observação: o balanço é classificado por meio de notas que variam de 0 (quando a depleção é negligenciável se comparada ao estoque do nutriente no solo, não se esperando efeitos negativos futuros) até 6 (quando a depleção é considerada extremamente elevada, requerendo ações corretivas imediatas).

Fonte: Nutmon (2002).

No sistema genérico, não será adotada a opção de indicar doses suplementares, conforme sugerido nos estudos do FERTICALC, pelo menos até que o problema de análise da viabilidade econômica dessas doses suplementares seja devidamente equacionado. A sugestão é que o sistema utilize, inicialmente, a abordagem simplificada de sempre indicar, como dose mínima, a quantidade de nutrientes que está sendo exportada pela colheita. Assim, mesmo que a diferença entre a demanda da cultura e o fornecido pelo solo seja negativa, ou seja, o solo seja capaz de fornecer mais do que a necessidade da cultura, o sistema, neste caso, não recomendará dose zero, mas a soma dos nutrientes de todos os componentes exportados, transformada em dose a ser aplicada ao solo pelo mesmo método de cálculo utilizado quando a diferença for positiva (item 3.3.2.2). O termo 'Nut_{sust}' da equação 23 corresponde, então, à soma do conteúdo dos nutrientes nos

²³ Essas facilidades de análise, se bem utilizadas, podem vir a atender aos dois segmentos interessados na sustentabilidade, mas que a vêem sob pontos de vistas distintos (Gray, 1991). Por um lado, a sociedade, que vê a sustentabilidade em termos de provimento de alimentos e matérias-primas de forma abundante e com qualidade, a chamada 'segurança alimentar' (FAO, 2003 e FIVMS, 2003). De outro, os produtores rurais, que vêem as ações para garantir a sustentabilidade como um recurso a mais de manutenção da lucratividade da exploração em longo prazo. Assim, o produtor, como indivíduo, pode estar disposto, num dado momento, a assumir uma redução temporária no grau de sustentabilidade da exploração com vistas à sustentabilidade no longo prazo, quando são necessários gastos extras com a conservação do solo, por exemplo. Para a sociedade, a análise da situação do conjunto dos produtores é a informação mais relevante (Zentner, 1981).

componentes exportados e somente será considerado no cálculo se a diferença $(Nut_{planta} - Nut_{solo})$ for negativa.

4. Descrição do Sistema Genérico proposto

O sistema compõe-se, basicamente, da seguinte estrutura:

- 1) Modelagem da estrutura das culturas com relação aos componentes a serem considerados no cálculo da demanda de nutrientes. Um dos componentes estruturais é designado, quando for o caso, como 'componente exportado' (CE), que corresponde à produtividade da cultura, e os outros designados, em conjunto, como 'demais componentes' (DC). A matéria seca de DC é calculada em função de CE e são especificados índices de particionamento da matéria seca de DC para cada componente, visando calcular as quantidades de nutrientes requeridas em cada componente, as quais são somadas para definir a demanda da cultura;
- 2) Modelagem da demanda de nutrientes no solo, considerando taxas de recuperação, pela planta, para cada nutriente;
- 3) Modelagem do suprimento de N pelo solo, considerando-se o teor de matéria orgânica do solo e a taxa anual de mineralização da matéria orgânica, a qual é ponderada, para cada mês, com base na relação entre a evapotranspiração real do mês e a evapotranspiração anual;
- 4) Modelagem do suprimento atual de P, K e S²⁴ pelo solo. Estima-se, inicialmente, o suprimento potencial em função da 'produtividade potencial'²⁵ e depois estima-se o suprimento atual como uma fração do suprimento potencial proporcional ao 'índice de suficiência' (relação entre o teor atual e o teor suficiente para a 'produtividade potencial').

²⁴ Nesse trabalho não são abordados os micronutrientes por se considerar que, pela pequena quantidade em que são demandados pelas culturas, a relação custo/benefício de sua aplicação é sempre baixa o suficiente para permitir a adoção da estratégia de aplicações preventivas, sempre que houver suspeita da ocorrência de deficiências que possam limitar a produtividade da cultura (Angus et al., 1993). Em outras palavras, é importante ter em mente que esses nutrientes podem ter grande influência na produtividade das culturas, mas considera-se que o problema relacionado a eles é a diagnose da necessidade da aplicação e não a determinação da dose a ser aplicada.

²⁵ Os termos 'produtividade potencial', 'produtividade esperada' e 'produtividade almejada' representam conceitos distintos e importantes na descrição desse sistema, estando definidos nos itens 4.1.3 e 4.2.2.

A seguir, apresenta-se o detalhamento dessa estrutura.

4.1. Cálculo da demanda de nutrientes

O primeiro passo para configurar o cálculo da demanda de nutrientes foi criar uma lista das culturas contempladas no sistema. Foram arroladas 144 culturas e, com o desdobramento de algumas delas em suas fases de manejo, como plantio, formação e produção, atinge-se um total de 279 opções de recomendação. Acredita-se que essa lista seja suficiente para atender às necessidades de recomendações dos profissionais de Agronomia do Brasil.

4.1.1 Agrupamento das culturas

As culturas foram agrupadas, de acordo com a semelhança agronômica, em 'Folhosas', 'Herbáceas', 'Arbóreas' (com sub-divisão para fases de manejo, como 'Implantação', 'Formação' e 'Produção'), 'Florestais' (com a mesma sub-divisão do grupo anterior), 'Fenos e silagens' e 'Pastagens' (Quadro 11). A idéia inicial foi que tal agrupamento permitiria estabelecer regras para o cálculo da demanda, em termos de componentes considerados, para cada grupo, o que facilitaria muito a configuração do sistema. No entanto, devido a grandes diferenças anatômicas entre as culturas, ainda que pertencentes a um mesmo grupo, não foi possível estabelecer regras gerais aplicáveis ao grupo como um todo. Apesar desse insucesso, optou-se por manter o agrupamento por esse ter a finalidade de facilitar a seleção de culturas pelo usuário do sistema.

Quadro 11. Grupos de culturas adotados no sistema genérico proposto: sua denominação, descrição e exemplos de representantes. A lista completa das culturas encontra-se no quadro 13.

Grupo	Descrição	Exemplos
Folhosas	O produto comercial (componente exportado) corresponde a toda a parte aérea da planta (folhas, formando 'maços' ou 'cabeças'). Todas são hortaliças herbáceas.	Salsa, Rúcula, Mostarda, Escarola, Confrei, Chicória, Cebolinha de folha, Almeirão, Alface, Aipo (Salsão), Agrião.
Herbáceas ¹	Esse grupo corresponde às plantas herbáceas ou arbustivas (não há produção de volumes significativos de madeira). Os produtos exportados podem ser frutos, flores ou inflorescências, grãos ou sementes, caules subterrâneos, dentre outros.	Abacaxi, Alho, Batata, Tomate, Arroz, Milho, Soja, Cana-de-açúcar, Quiabo, Rabanete
Arbóreas	Esse grupo corresponde às fruteiras, em geral. Cada cultura desse grupo está dividida em fases de 'Implantação', 'Formação' e 'Produção'.	Abacate, Café, Caju, Manga, Laranja
Florestais	Grupo específico para as culturas de Eucaliptus e Pinus, cada uma também dividida em fases de 'Implantação', 'Formação' e 'Produção'.	Eucaliptus e Pinus
Fenos e silagens	Culturas em que toda a parte aérea é exportada para a confecção de fenos e silagens, mas, diferentemente do grupo 'Folhosas', os vários órgãos exportados em conjunto, como folhas, colmos e ramos, podem ser claramente distinguidos para efeito de cálculo da demanda de nutrientes.	Alfafa, Capineiras (de diferentes espécies de gramíneas), Milho e Sorgo forrageiro
Pastagens	Semelhantes ao grupo 'Fenos e silagens', mas apenas as folhas são consideradas como componente exportado.	Diversas espécies de gramíneas

¹ Algumas das culturas enquadradas nesse grupo não são, botanicamente falando, herbáceas, como é o caso do bambu. Apesar de incoerências como esta, a denominação 'herbáceas' foi a mais genérica encontrada para representar o grupo.

4.1.2 Definição de componentes estruturais para maior detalhamento do cálculo da demanda de nutrientes

O estudo das características estruturais e agronômicas das culturas que compõem a lista levou à identificação de sete componentes estruturais, que são órgãos ou conjunto de órgãos, que podem ser considerados para o cálculo da demanda de acordo com a cultura. Cada componente é dividido em uma subcategoria denominada tipo de componente (Quadro 12), o que é necessário para atender às configurações específicas de cada cultura. A classificação e denominação dos componentes e seus tipos, adotadas no presente trabalho, são arbitrárias, de cunho eminentemente prático e, portanto, não seguem qualquer sistema oficial de classificação ou denominação de órgãos vegetais.

Quadro 12. Componentes e tipos de componentes que podem ser adotados no cálculo da demanda de nutrientes, conforme a cultura.

Componente	Descrição	Tipos de componentes
Componente aéreo	Componente específico dos grupos de culturas denominados 'Folhosas' e 'Fenos e silagens', em que todas as estruturas aéreas são exportadas em conjunto.	Toda a parte aérea
Componente subterrâneo	Inclui os órgãos subterrâneos, como raízes e caules subterrâneos.	Raízes Rizomas Tubérculos Bulbos
Componente de estrutura primária	São órgãos de sustentação primária da planta, ou seja, sustentam a estrutura secundária.	Caules Troncos Estipes Colmos Pseudocauls
Componente de estrutura secundária	Corresponde, em geral, a ramificações do componente de estrutura primária. Sustentam órgãos de atividade metabólica e reprodutiva.	Ramos
Componente de atividade metabólica	Corresponde ao conjunto de folhas.	Folhas
Componente reprodutivo	Engloba todas as estruturas reprodutivas.	Frutos Parte de frutos Flores Inflorescências Grãos/Sementes Sementes+Fibras
Componente Material extra	O tipo de componente 'Látex' visa atender especificamente à cultura da seringueira e o tipo de componente 'Outros' pode ser usado para designar qualquer estrutura não contemplada acima e que seja julgada importante de se considerar no cálculo, a critério do usuário do sistema.	Látex Outros

Os tipos de componentes designados para cada cultura estão listados no quadro 13. Pelo menos um dos tipos de componentes é estabelecido como 'Componente exportado' (CE), no qual é baseada a medida de produtividade da cultura. Os outros são denominados, em conjunto, como 'Demais componentes' (DC). Algumas das culturas possuem fases de 'Implantação', 'Formação' e 'Produção', mas, em termos de configuração do sistema, essas fases são tratadas como culturas independentes, para as quais também se estabeleceram tipos de componentes. Para as fases de 'Implantação' e 'Formação' não há nenhum tipo de componente designado como 'exportado'.

Quadro 13. Lista das culturas estudadas para a configuração do cálculo da demanda, o grupo em que foram enquadradas, o componente exportado e demais componentes (não exportados)

Denominação	Grupo	Tipo de componente exportado	Demais tipos de componentes
Abacate (<i>Persea americana</i>)	Arbóreas/Produção	Frutos	Raizes Caules Ramos Folhas
Abacaxi (<i>Ananas comosus</i>)	Herbáceas	Frutos	Raizes Caules Folhas
Abóbora (<i>Curcubita pepo</i>)	Herbáceas	Frutos	Raizes Ramos Folhas
Acerola (<i>Malpighia glabra</i>)	Arbóreas/Produção	Frutos	Raizes Caules Ramos Folhas
Agrião (<i>Agrion virgo</i>)	Folhosas	Toda a parte aérea	Raizes
Aipo ou Salsão (<i>Apium graveolens</i>)	Folhosas	Toda a parte aérea	Raizes
Alcachofra (<i>Cynara cardunculus</i> var. <i>scolymus</i>)	Herbáceas	Inflorescências	Raizes Caules Folhas
Alface (<i>Lactuca sativa</i> L.)	Folhosas	Toda a parte aérea	Raizes
Algodão (<i>Gossypium barbadense</i>)	Herbáceas	Sementes+Fibras	Raizes Caules Ramos Folhas
Alho (<i>Allium sativum</i>)	Herbáceas	Bulbos	Raizes Folhas
Alho porro (<i>Allium porrum</i> L.)	Folhosas	Toda a parte aérea	Raizes
Almeirão (<i>Cichorium intybus</i> L.)	Folhosas	Toda a parte aérea	Raizes
Ameixa (<i>Prunus salicina</i> L.)	Arbóreas/Produção	Frutos	Raizes Caules Ramos Folhas
Amendoim (<i>Arachis hypogaea</i> L.)	Herbáceas	Frutos	Raizes Caules Ramos Folhas
Amora (<i>Rubus sp</i>)	Arbóreas/Produção	Folhas	Raizes Caules Ramos Frutos
Antúrio (<i>Anthurium andraeanum</i> Lindl.)	Herbáceas	Flores	Raizes Ramos Folhas

continua...

continuação...

Denominação	Grupo	Tipo de componente exportado	Demais tipos de componentes
Araruta (<i>Maranta arundinacea</i> L.)	Herbáceas	Rizomas	Raizes Caules Ramos Folhas
Arroz de sequeiro (<i>Oryza sativa</i> L.)	Herbáceas	Grãos/Sementes	Raizes Colmos Folhas
Arroz irrigado (<i>Oryza sativa</i> L.)	Herbáceas	Grãos/Sementes	Raizes Colmos Folhas
Aspargo (<i>Asparagus officinalis</i> L.)	Herbáceas	Caules	Raizes Ramos Folhas
Aveia (grãos) (<i>Avena sativa</i> L.)	Herbáceas	Grãos/Sementes	Raizes Colmos Folhas
Azevém (<i>Lolium perenne</i> L.)	Herbáceas	Grãos/Sementes	Raizes Colmos Folhas
Bambu (<i>Bambusa spp.</i>)	Herbáceas	Colmos	Raizes Ramos Folhas
Banana (<i>Musa spp</i>)	Arbóreas/Produção	Frutos	Raizes Rizomas Pseudocaules Folhas
Batata (<i>Solanum tuberosum</i> L.)	Herbáceas	Tubérculos	Caules Ramos Folhas
Batata doce (<i>Ipomea batatas</i> (L.) Lam.)	Herbáceas	Tubérculos	Caules Ramos Folhas
Berinjela (<i>Solanum melongea</i>)	Herbáceas	Frutos	Raizes Caules Ramos Folhas
Beterraba (<i>Beta vulgairs</i>)	Herbáceas	Raizes	Folhas
Brócolis (<i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>itálica</i> Plenck)	Herbáceas	Inflorescências	Raizes Caules Folhas
Bucha (<i>Luffa cylindrica</i> (L.) Roem.)	Herbáceas	Frutos	Raizes Caules Ramos Folhas

continua...

continuação

Denominação	Grupo	Tipo de componente exportado	Demais tipos de componentes
Cacau (<i>Theobroma cacao</i> L.)	Arbóreas/Produção	Frutos	Raízes Caules Ramos Folhas
Café (<i>Coffea arábica</i> L.)	Arbóreas/Produção	Frutos	Raízes Caules Ramos Folhas
Caju anão (<i>Anacardium occidentale</i>)	Arbóreas/Produção	Frutos	Raízes Caules Ramos Folhas
Camomila (<i>Matricaria camomilla</i> L.)	Herbáceas	Flores	Raízes Ramos Folhas
Cana de açúcar (<i>Saccharum spp.</i>)	Herbáceas	Colmos	Raízes Folhas
Canola (<i>Brassica rapa</i> L.)	Herbáceas	Grãos/Sementes	Raízes Ramos Folhas
Caqui (<i>Diospyros kaki</i> L.)	Arbóreas/Produção	Frutos	Raízes Caules Ramos Folhas
Cará (<i>Dioscorea alata</i> L.)	Herbáceas	Raízes	Ramos Folhas
Cebola (<i>Allium cepa</i> L.)	Herbáceas	Bulbos	Folhas
Cebolinha de folha (<i>Allium fistulosum</i> L.)	Folhosas	Toda a parte aérea	Raízes
Cenoura (<i>Daucus carota</i> L.)	Herbáceas	Raízes	Ramos Folhas
Centeio (<i>Secale cereale</i> L.)	Herbáceas	Grãos/Sementes	Raízes Colmos Folhas
Cevada (<i>Hordeum distichum</i> L.)	Herbáceas	Grãos/Sementes	Raízes Colmos Folhas
Chicória (<i>Cichorium endivia</i> L.)	Folhosas	Toda a parte aérea	Raízes
Chuchu (<i>Sechium edule</i> (Jacq.) Swartz.)	Herbáceas	Frutos	Raízes Ramos Folhas
Coco (frutos) (<i>Cocos nucifera</i> L.)	Arbóreas/Produção	Frutos	Raízes Estipes Folhas

Continua...

continuação

Denominação	Grupo	Tipo de componente exportado	Demais tipos de componentes
Coco (copra) (<i>Cocos nucifera</i> L.)	Arbóreas/Produção	Parte dos frutos	Raizes Estipes Folhas
Confrei (<i>Symphytum officinale</i> L.)	Folhosas	Toda a parte aérea	Raizes
Couve flor (<i>Brassica Oleracea</i> L. var. <i>botrytis</i>)	Herbáceas	Inflorescências	Raizes
Couve manteiga (<i>Brassica Oleracea</i> L. var. <i>acephala</i>)	Herbáceas	Folhas	Folhas Raizes Caules
Crisântemo (<i>Dendranthema morifolium</i>)	Herbáceas	Flores	Bulbos Folhas
Erva mate (<i>Camellia sinensis</i>)	Arbóreas/Produção	Folhas	Raizes Caules Ramos
Ervilha (<i>Pisum sativum</i> L.)	Herbáceas	Grãos/Sementes	Raizes Ramos Folhas
Estévia (<i>Stevia rebaudiana</i>)	Folhosas	Toda a parte aérea	Raizes
Eucalipto (óleo) (<i>Eucalyptus</i> spp.)	Arbóreas/Produção	Folhas	Raizes Caules Ramos
Eucalipto (madeira) (<i>Eucalyptus</i> spp.)	Arbóreas/Florestais	Troncos	Raizes Ramos Folhas
Feijão (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	Herbáceas	Grãos/Sementes	Raizes Ramos Folhas
Feijão azuki (<i>Vigna angularis</i>)	Herbáceas	Grãos/Sementes	Raizes Ramos Folhas
Feijão de Lima (<i>Phaseolus lunatus</i> L.)	Herbáceas	Frutos	Raizes Ramos Folhas
Feijão fava (<i>Vicia faba</i> L.)	Herbáceas	Frutos	Raizes Ramos Folhas
Figo (<i>Ficus carica</i> L.)	Arbóreas/Produção	Frutos	Raizes Caules Ramos Folhas
Fumo (<i>Nicotiana tabacum</i>)	Herbáceas	Folhas	Raizes Ramos
Funcho (Erva doce) (<i>Foeniculum vulgare</i>)	Herbáceas	Grãos/Sementes	Raizes Ramos Folhas

Continua...

continuação

Denominação	Grupo	Tipo de componente exportado	Demais tipos de componentes
Gengibre (<i>Zingiber officinalis</i>)	Herbáceas	Rizomas	Ramos Folhas
Gergelim (<i>Sesamum indicum</i> L.)	Herbáceas	Grãos/Sementes	Raizes Ramos Folhas
Girassol (<i>Helianthus annuus</i> L.)	Herbáceas	Grãos/Sementes	Raizes Caules Folhas
Goiaba (<i>Psidium guajava</i> L.)	Arbóreas/Produção	Frutos	Raizes Caules Ramos Folhas
Grão de bico (<i>Cicer arietinum</i> L.)	Herbáceas	Grãos/Sementes	Raizes Ramos Folhas
Hortelã (<i>Mentha arvensis</i> L.)	Herbáceas	Folhas	Raizes Ramos
Inhame (<i>Colocasia esculenta</i>)	Herbáceas	Rizomas	Ramos Folhas
Jiló (<i>Solanum gilo</i>)	Herbáceas	Frutos	Raizes Caules Ramos Folhas
Juta (<i>Corchorus sp.</i>)	Herbáceas	Caules	Raizes Ramos Folhas
Laranja (<i>Citrus sinensis</i>)	Arbóreas/Produção	Frutos	Raizes Caules Ramos Folhas
Limão (<i>Citrus limon</i>)	Arbóreas/Produção	Frutos	Raizes Caules Ramos Folhas
Linho (<i>Linum usitatissimum</i>)	Herbáceas	Caules	Raizes Ramos Folhas
Maçã (<i>Malus spp.</i>)	Arbóreas/Produção	Frutos	Raizes Caules Ramos Folhas
Macadâmia (<i>Macadamia integrifolia</i>)	Arbóreas/Produção	Frutos	Raizes Caules Ramos Folhas
Mamão (<i>Carica papaya</i>)	Arbóreas/Produção	Frutos	Raizes Caules Folhas
Continua...			

continuação

Denominação	Grupo	Tipo de componente exportado	Demais tipos de componentes
Mamona (<i>Ricinus communis</i>)	Herbáceas	Grãos/Sementes	Raizes Caules Ramos Folhas
Mandioca (<i>Manihot esculenta</i>)	Herbáceas	Raizes	Caules Ramos Folhas
Mandioquinha salsa (<i>Arracacia xanthorrhiza</i>)	Herbáceas	Raizes	Ramos Folhas
Manga (<i>Mangifera indica</i>)	Arbóreas/Produção	Frutos	Raizes Caules Ramos Folhas
Maracujá (<i>Passiflora spp.</i>)	Herbáceas	Frutos	Raizes Caules Ramos Folhas
Marmelo (<i>Cydonia oblonga</i>)	Arbóreas/Produção	Frutos	Raizes Caules Ramos Folhas
Melancia (<i>Citrullus lanatus</i>)	Herbáceas	Frutos	Raizes Ramos Folhas
Melão (<i>cucumis melo</i>)	Herbáceas	Frutos	Raizes Ramos Folhas
Milho (<i>Zea mays</i>)	Herbáceas	Grãos/Sementes	Raizes Colmos Folhas
Moranga (<i>Curcubita spp.</i>)	Herbáceas	Frutos	Raizes Caules Folhas
Morango (<i>Fragaria x ananassa</i>)	Herbáceas	Frutos	Raizes Ramos Folhas
Mostarda (<i>Brassica nigra</i>)	Folhosas	Toda a parte aérea	Raizes
Nabo (<i>Raphanus sativus</i>)	Herbáceas	Raizes	Ramos
Nectarina (<i>Prunus persica</i> L. Var. <i>Nucipersica</i>)	Arbóreas/Produção	Frutos	Raizes Caules Ramos Folhas
Nêspera (<i>Eriobotrya japonica</i>)	Arbóreas/Produção	Frutos	Raizes Caules Ramos Folhas

Continua...

Continuação

Denominação	Grupo	Tipo de componente exportado	Demais tipos de componentes
Pastagem	Pastagens	Folhas	Raizes Colmos Inflorescências
Pecã (<i>Carya illinoensis</i>)	Arbóreas/Produção	Frutos	Raizes Caules Ramos Folhas
Pepino (<i>Cucumis sativus</i>)	Herbáceas	Frutos	Raizes Caules Folhas
Pêra (<i>Pyrus sp.</i>)	Arbóreas/Produção	Frutos	Raizes Caules Ramos Folhas
Pêssego (<i>Prunus pérsica</i> Batsch)	Arbóreas/Produção	Frutos	Raizes Caules Ramos Folhas
Pimenta do reino (<i>Piper nigrum</i> L.)	Herbáceas	Frutos	Raizes Caules Ramos Folhas
Pimenta hortícola (<i>Capsicum spp.</i>)	Herbáceas	Frutos	Raizes Ramos Folhas
Pimentão (<i>Capsicum annuum</i> L.)	Herbáceas	Frutos	Raizes Ramos Folhas
Pinus (<i>Pinus sp.</i>)	Arbóreas/Florestais	Troncos	Raizes Ramos Folhas Inflorescências
Píreto (<i>Chrysanthemum cinerariaefolium</i>)	Herbáceas	Flores	Raizes Ramos Folhas
Pupunha (<i>Bactris gasipaes</i>)	Arbóreas/Produção	Estipes	Raizes Folhas
Quenafe (<i>Hibiscus cannabinus</i> L.)	Herbáceas	Caules	Raizes Ramos Folhas
Quiabo (<i>Hibiscus esculentus</i> L.)	Herbáceas	Frutos	Raizes Caules Ramos Folhas
Rabanete (<i>Raphanus sativus</i> L.)	Herbáceas	Raizes	Folhas

Continua...

continuação

Denominação	Grupo	Tipo de componente exportado	Demais tipos de componentes
Rami (<i>Boehmeria nivea</i> Gaud.)	Herbáceas	Caules	Raizes Ramos Folhas
Repolho (<i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>capitata</i> L.)	Folhosas	Toda a parte aérea	Raizes
Rosa (<i>Rosa</i> spp.)	Herbáceas	Flores	Raizes Caules Ramos Folhas
Rúcula (<i>Eruca vesicata sativa</i> (Mill.) Thell.)	Folhosas	Toda a parte aérea	Raizes
Salsa (<i>Petroselinum crispum</i> (Mill.) Nym. Ex. A.W. Hill)	Folhosas	Toda a parte aérea	Raizes
Seringueira (<i>Hevea brasiliensis</i>)	Arbóreas/Produção	Látex	Raizes Caules Ramos Folhas
Sisal (<i>Agave sisalana</i>)	Herbáceas	Caules	Raizes Ramos Folhas
Soja (<i>Glycine Max</i>)	Herbáceas	Grãos/Sementes	Raizes Caules Ramos Folhas
Sorgo granífero (<i>Sorghum bicolor</i>)	Herbáceas	Grãos/Sementes	Raizes Colmos Folhas
Sorgo vassoura (<i>Sorghum bicolor</i>)	Herbáceas	Inflorescências	Raizes Colmos Folhas
Tangerina (<i>Citrus reticulata</i>)	Arbóreas/Produção	Frutos	Raizes Caules Ramos Folhas
Teca (<i>Tectonia grandis</i>)	Arbóreas/Florestais	Troncos	Raizes Ramos Folhas
Tomate (<i>Lycopersicon</i> <i>esculentum</i>)	Herbáceas	Frutos	Raizes Caules Ramos Folhas
Trigo (<i>Triticum aestivum</i> L.)	Herbáceas	Grãos/Sementes	Raizes Colmos Folhas

Continua...

continuação

Denominação	Grupo	Tipo de componente exportado	Demais tipos de componentes
Triticale (<i>X Triticosecale</i> Wittmack)	Herbáceas	Grãos/Sementes	Raízes Colmos Folhas
Urucum (<i>Bixa orellana</i> L.)	Arbóreas/Produção	Grãos/Sementes	Raízes Caules Ramos Folhas
Uva (<i>Vitis spp.</i>)	Arbóreas/Produção	Frutos	Raízes Caules Ramos Folhas
Vetiver (<i>Vetiveria zizanioides</i>)	Herbáceas	Raízes	Ramos Folhas

4.1.3 Estimativa da matéria seca dos componentes pela produtividade comercial

Como já explicado (item 3.3.2.1 e Quadro 9), a relação entre as matérias secas de componentes, $DC = f(CE)$, no sistema genérico, em que será utilizado o índice de colheita (IC), fica $DC = (CE / IC) - CE$. Com tal relação, calcula-se a matéria seca de DC a partir da produtividade comercial. A matéria seca de DC, assim calculada, é distribuída segundo coeficientes de alocação especificados para cada componente.

Como a produtividade comercial é um importante parâmetro de cálculo, o sistema deve prover uma maneira objetiva de estimá-lo, visando evitar estimativas pouco realistas pelos usuários. Propõe-se que o sistema contenha, para cada cultura, o padrão de 'produtividade potencial', refletindo a capacidade produtiva da cultura sem as limitações por deficiências nutricionais ou ambiente químico desfavorável no solo, como excesso de acidez. A 'produtividade esperada' será estimada pela multiplicação da 'produtividade potencial' pelo menor dos três índices de suficiência (IS) calculados com os resultados da análise de P disponível (IS_P), K trocável (IS_K) e saturação por bases ($IS_{V\%}$), cujos valores variam de zero a 100 %:

$$\text{Equação 31: } \text{ProdEsp} = (\text{ProdPot} \times IS_{P \text{ ou } K \text{ ou } V\%}) / 100$$

em que

ProdEsp e ProdPot = respectivamente a 'produtividade esperada' e 'produtividade potencial', em kg ha^{-1} ;

IS_P ou IS_K ou $IS_{V\%}$ = respectivamente os índices de suficiência de P disponível, K trocável e saturação por bases, em %, sendo utilizado o de menor valor.

Os índices de suficiência de P e K (IS_P e IS_K) serão aqueles estimados conforme o método descrito no item 4.2.2.

Resultados experimentais com as relações entre a saturação por bases e a produtividade servirão para compor equações para estimar $ISV\%$ para as culturas (Figura 11).

É importante ressaltar que o padrão de 'produtividade potencial' das culturas deve ser estabelecido cuidadosamente, pois além de balizar a 'produtividade esperada', será também um parâmetro chave na determinação do suprimento de nutrientes pelo solo, segundo o método de cálculo sugerido no item 4.2.2. Deve-se ter em mente, também, a diferença dos conceitos de 'produtividade esperada' e 'produtividade almejada'. A 'produtividade esperada', como resultado do cálculo da equação 31, é uma estimativa do que é possível alcançar com as condições nutricionais atuais do solo, indicadas pela análise química, enquanto que a chamada 'produtividade almejada' é aquela que se pretende atingir com a adubação. A importância dessa distinção ficará clara na descrição do cálculo do suprimento de nutrientes pelo solo (item 4.2.2).

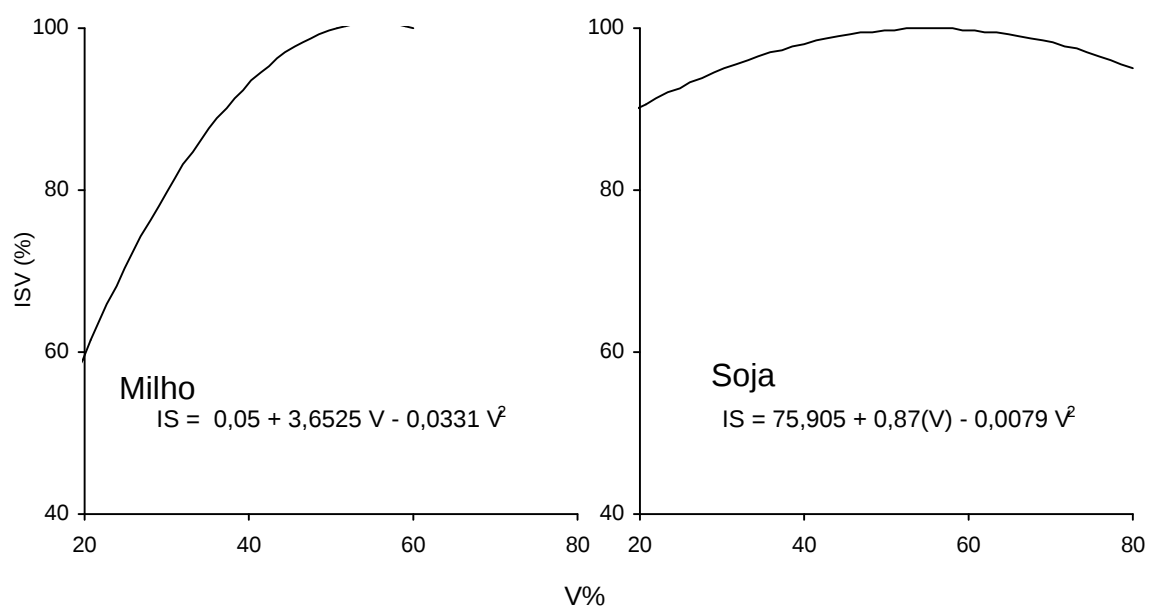


Figura 11. Equações para estimar o índice de suficiência da saturação por bases ($IS_{V\%}$) para as culturas do milho²⁶ (preparada com dados de Quaggio, 1985) e soja (preparada com dados de Klepker et al., 2002). Os dados utilizados para a cultura do milho são genéricos, não especificam a região. Os dados para a cultura da soja são para solos tropicais de baixa latitude, na Região Nordeste do Brasil.

4.1.4 Planilha para pesquisa de informações para o cálculo da demanda nutricional

Baseado no delineamento apresentado, sugere-se uma planilha genérica para orientar a prospecção de informações para cada cultura (Quadro 14). Essas informações correspondem a médias para diversas condições e serão adicionadas ao sistema e apresentadas ao usuário como valores padrões que poderão ser adaptados para refletir condições específicas.

Mesmo a cultura já tendo um dos tipos componentes estabelecido como exportado, o usuário poderá, a seu critério, estabelecer outros tipos de componentes, dentre os demais listados para a cultura, como exportação adicional.

Para exemplificar, são apresentadas planilhas semi-preenchidas para culturas representativas de cada grupo: Alface (Quadro 15), Tomate estaqueado (Quadro 16), Laranja-primeiro ano (Quadro 17), Banana-primeira produção (Quadro 18),

²⁶ A equação foi preparada com pares de dados estimados graficamente, pois na publicação consultada (Quaggio, 1985) não constavam os dados originais. Portanto, deve ser considerada apenas para exemplificação.

Eucalipto para produção de madeira (Quadro 19), Alfafa (Quadro 20) e Pastagem (Quadro 21).

Quadro 14. Planilha genérica para preenchimento de dados para o cálculo da demanda de nutrientes pelas culturas.

Planilha para preenchimento de dados do sistema									
Cultura:									
Grupo:									
Produtividade potencial:									
Índice de colheita:									
Umidade do produto:									
Acúmulo anual de mat. seca ¹ :									
Componente ²	Tipo	Exp. ⁴	Alocação	N	P	K	Ca	Mg	S
		s/n	%	g kg ⁻¹					
Aéreo (em conjunto)									
Subterrâneo									
Sust. Primária									
Sust. Secundária									
Ativ. Metabólica									
Reprodutivo									
Extra									
Taxa de recuperação do nutriente do solo pela planta (%):									
³ Variabilidade de NCF _P é crítica?		☐ S ☐ N	NCF _{P, inf} :	NCF _{P, sup} :					
Variabilidade de NCF _S é crítica?		☐ S ☐ N	NCF _{S, inf} :	NCF _{S, sup} :					

¹ Acúmulo anual de matéria seca = para culturas dos grupos Arbóreas' (no período de formação) e 'Florestais';

² os componentes estão descritos no quadro 12;

³ NCF_P e NCF_S são, respectivamente, o nível crítico foliar para P e S, para utilização na equação 24 (página 53).

⁴ Componente exportado (s = sim) ou não (n = não)

Quadro 15. Planilha para a cultura 'Alface'. O sinal de interrogação corresponde aos dados que devem ser prospectados.

Planilha para preenchimento de dados do sistema									
Cultura: <i>Alface</i>									
Grupo: <i>Folhosas</i>									
Produtividade potencial: ?									
Índice de colheita: ?									
Umidade do produto: ?									
Acúmulo anual de mat. seca: Não se aplica									
Componente	Tipo	Exp. s/n	alocação %	N	P	K	Ca	Mg	S
				g kg ⁻¹					
Aéreo (em conjunto)	<i>Parte aérea</i>	S	-	?	?	?	?	?	?
Subterrâneo	<i>Raízes</i>	N	?	?	?	?	?	?	?
Sust. Primária	<i>Não se aplica</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Sust. Secundária	<i>Não se aplica</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Ativ. Metabólica	<i>Não se aplica</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Reprodutivo	<i>Não se aplica</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Extra	<i>Não se aplica</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Taxa de recuperação do nutriente do solo pela planta (%):				?	?	?	?	?	?
Variabilidade de NCF _P é crítica? ☐ S ☐ N				NCF _{P, inf} : ?		NCF _{P, sup} : ?			
Variabilidade de NCF _S é crítica? ☐ S ☐ N				NCF _{S, inf} : ?		NCF _{S, sup} : ?			

Quadro 16. Planilha para a cultura 'Tomate (estaqueado)'. O sinal de interrogação corresponde aos dados que devem ser prospectados.

Planilha para preenchimento de dados do sistema									
Cultura: <i>Tomate (estaqueado)</i>									
Grupo: <i>Herbáceas</i>									
Produtividade potencial: ?									
Índice de colheita: ?									
Umidade do produto: ?									
Acúmulo anual de mat. seca: Não se aplica									
Componente	Tipo	Exp. s/n	alocação %	N	P	K	Ca	Mg	S
				g kg ⁻¹					
Aéreo (em conjunto)	<i>Não se aplica</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Subterrâneo	<i>Raízes</i>	N	?	?	?	?	?	?	?
Sust. Primária	<i>Caules</i>	N	?	?	?	?	?	?	?
Sust. Secundária	<i>Ramos</i>	N	?	?	?	?	?	?	?
Ativ. Metabólica	<i>Folhas</i>	N	?	?	?	?	?	?	?
Reprodutivo	<i>Frutos</i>	S	-	?	?	?	?	?	?
Extra	<i>Não se aplica</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Taxa de recuperação do nutriente do solo pela planta (%):				?	?	?	?	?	?
Variabilidade de NCF _P é crítica? ☐ S ☐ N				NCF _{P, inf} : ?		NCF _{P, sup} : ?			
Variabilidade de NCF _S é crítica? ☐ S ☐ N				NCF _{S, inf} : ?		NCF _{S, sup} : ?			

Quadro 17. Planilha para a cultura 'Laranja-Primeiro ano'. O sinal de interrogação corresponde aos dados que devem ser prospectados.

Planilha para preenchimento de dados do sistema									
Cultura: <i>Laranja-Primeiro ano</i>									
Grupo: <i>Arbóreas/Formação</i>									
Produtividade potencial: <i>Não se aplica</i>									
Índice de colheita: <i>Não se aplica</i>									
Umidade do produto: <i>Não se aplica</i>									
Acúmulo anual de mat. seca: ?									
Componente	Tipo	Exp. s/n	alocação %	N	P	K	Ca	Mg	S
				g kg ⁻¹					
Aéreo (em conjunto)	<i>Não se aplica</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Subterrâneo	<i>Raízes</i>	<i>N</i>	?	?	?	?	?	?	?
Sust. Primária	<i>Caulos</i>	<i>N</i>	?	?	?	?	?	?	?
Sust. Secundária	<i>Ramos</i>	<i>N</i>	?	?	?	?	?	?	?
Ativ. Metabólica	<i>Folhas</i>	<i>N</i>	?	?	?	?	?	?	?
Reprodutivo	<i>Não se aplica</i>	-	-	?	?	?	?	?	?
Extra	<i>Não se aplica</i>	-	-	?	?	?	?	?	?
Taxa de recuperação do nutriente do solo pela planta (%):				?	?	?	?	?	?
Variabilidade de NCF _P é crítica? ☐ S ☐ N				NCF _{P, inf} : ?		NCF _{P, sup} : ?			
Variabilidade de NCF _S é crítica? ☐ S ☐ N				NCF _{S, inf} : ?		NCF _{S, sup} : ?			

Quadro 18. Planilha para a cultura 'Banana-Primeira produção'. O sinal de interrogação corresponde aos dados que devem ser prospectados.

Planilha para preenchimento de dados do sistema									
Cultura: <i>Banana-Primeira produção</i>									
Grupo: <i>Arbóreas/Produção</i>									
Produtividade potencial: ?									
Índice de colheita: ?									
Umidade do produto: ?									
Acúmulo anual de mat. seca: <i>Não se aplica</i>									
Componente	Tipo	Exp. s/n	alocação %	N	P	K	Ca	Mg	S
				g kg ⁻¹					
Aéreo (em conjunto)	<i>Não se aplica</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Subterrâneo	<i>Raízes</i>	<i>N</i>	?	?	?	?	?	?	?
Sust. Primária	<i>Rizomas</i>	<i>N</i>	?	?	?	?	?	?	?
Sust. Secundária	<i>Pseudocaulos</i>	<i>N</i>	?	?	?	?	?	?	?
Ativ. Metabólica	<i>Folhas</i>	<i>N</i>	?	?	?	?	?	?	?
Reprodutivo	<i>Frutos</i>	<i>S</i>	-	?	?	?	?	?	?
Extra	<i>Não se aplica</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Taxa de recuperação do nutriente do solo pela planta (%):				?	?	?	?	?	?
Variabilidade de NCF _P é crítica? ☐ S ☐ N				NCF _{P, inf} : ?		NCF _{P, sup} : ?			
Variabilidade de NCF _S é crítica? ☐ S ☐ N				NCF _{S, inf} : ?		NCF _{S, sup} : ?			

Quadro 19. Planilha para a cultura 'Eucalipto (madeira)'. O sinal de interrogação corresponde aos dados que devem ser prospectados.

Planilha para preenchimento de dados do sistema									
Cultura: <i>Eucalipto (madeira)</i>									
Grupo: <i>Florestais</i>									
Produtividade potencial: ?									
Índice de colheita: ?									
Umidade do produto: ?									
Acúmulo anual de mat. seca: <i>Não se aplica</i>									
Componente	Tipo	Exp. s/n	alocação %	N	P	K	Ca	Mg	S
				g kg ⁻¹					
Aéreo (em conjunto)	<i>Não se aplica</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Subterrâneo	<i>Raízes</i>	N	?	?	?	?	?	?	?
Sust. Primária	<i>Troncos</i>	S	-	?	?	?	?	?	?
Sust. Secundária	<i>Ramos</i>	N	?	?	?	?	?	?	?
Ativ. Metabólica	<i>Folhas</i>	N	?	?	?	?	?	?	?
Reprodutivo	<i>Não se aplica</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Extra	<i>Não se aplica</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Taxa de recuperação do nutriente do solo pela planta (%):				?	?	?	?	?	?
Variabilidade de NCF _P é crítica? ☐ S ☐ N				NCF _{P, inf} : ?		NCF _{P, sup} : ?			
Variabilidade de NCF _S é crítica? ☐ S ☐ N				NCF _{S, inf} : ?		NCF _{S, sup} : ?			

Quadro 20. Planilha para a cultura 'Alfafa'. O sinal de interrogação corresponde aos dados que devem ser prospectados.

Planilha para preenchimento de dados do sistema									
Cultura: <i>Alfafa</i>									
Grupo: <i>Fenos e silagens</i>									
Produtividade potencial: ?									
Índice de colheita: <i>Não se aplica</i>									
Umidade do produto: ?									
Acúmulo anual de mat. seca: <i>Não se aplica</i>									
Componente	Tipo	Exp. s/n	alocação %	N	P	K	Ca	Mg	S
				g kg ⁻¹					
Aéreo (em conjunto)	<i>Não se aplica</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Subterrâneo	<i>Raízes</i>	N	?	?	?	?	?	?	?
Sust. Primária	<i>Caules</i>	S	?	?	?	?	?	?	?
Sust. Secundária	<i>Ramos</i>	S	?	?	?	?	?	?	?
Ativ. Metabólica	<i>Folhas</i>	S	?	?	?	?	?	?	?
Reprodutivo	<i>Flores</i>	S	?	?	?	?	?	?	?
Extra	<i>Não se aplica</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Taxa de recuperação do nutriente do solo pela planta (%):				?	?	?	?	?	?
Variabilidade de NCF _P é crítica? ☐ S ☐ N				NCF _{P, inf} : ?		NCF _{P, sup} : ?			
Variabilidade de NCF _S é crítica? ☐ S ☐ N				NCF _{S, inf} : ?		NCF _{S, sup} : ?			

Quadro 21. Planilha para a cultura 'Pastagem'. O sinal de interrogação corresponde aos dados que devem ser prospectados.

Planilha para preenchimento de dados do sistema									
Cultura: <i>Pastagem</i>									
Grupo: <i>Pastagens</i>									
Produtividade potencial: ?									
Índice de colheita: ?									
Umidade do produto: ?									
Acúmulo anual de mat. seca: <i>Não se aplica</i>									
Componente	Tipo	Exp. s/n	alocação %	N	P	K	Ca	Mg	S
				g kg ⁻¹					
Aéreo (em conjunto)	<i>Não se aplica</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Subterrâneo	<i>Raízes</i>	<i>N</i>	?	?	?	?	?	?	?
Sust. Primária	<i>Colmos</i>	<i>N</i>	?	?	?	?	?	?	?
Sust. Secundária	<i>Não se aplica</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Ativ. Metabólica	<i>Folhas</i>	<i>S</i>	-	?	?	?	?	?	?
Reprodutivo	<i>Inflorescências</i>	<i>N</i>	?	?	?	?	?	?	?
Extra	<i>Não se aplica</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Taxa de recuperação do nutriente do solo pela planta (%):				?	?	?	?	?	?
Variabilidade de NCF _P é crítica?		☐ S ☐ N	NCF _{P, inf} : ?	NCF _{P, sup} : ?					
Variabilidade de NCF _S é crítica?		☐ S ☐ N	NCF _{S, inf} : ?	NCF _{S, sup} : ?					

4.1.5 Correção dos teores de P e S dos componentes pela FCP do solo

Os teores informados ao sistema como padrões, pela planilha (Quadro 14), são médias de diversas situações. Para o P, esse teor médio deve ser corrigido para refletir a influência da FCP do solo, conforme já descrito (item 3.3.1.1). Os dados levantados nos estudos do FERTICALC indicaram a necessidade dessa correção para P e S, dentre os macronutrientes. No entanto, essa regra não foi considerada indispensável para todas as culturas, ora por deficiência de informações, ora porque os dados não indicaram tal necessidade. Dessa forma, não foi possível estabelecerem-se critérios objetivos para avaliar a necessidade dessa correção para culturas ainda não estudadas.

A sugestão para o sistema genérico é que a variabilidade do nível crítico foliar de P (NCF_P) na cultura, em diferentes tipos de solo, seja utilizada como um indicador da necessidade de correção do teor de P e S, de todos os componentes, de acordo com a FCP do solo, estimada pelo P remanescente ou pelo teor de argila. Se as informações pesquisadas para uma determinada cultura indicarem que a variabilidade do NCF_P é significativa, evidenciando que o NCF_P para a cultura varia significativamente com a FCP do solo, deverão ser informados os limites inferior e

superior dessa variabilidade ($NCF_{P\ inf}$ e $NCF_{P\ sup}$; $NCF_{S\ inf}$ e $NCF_{S\ sup}$) para que possa ser calculado o índice de correção dos teores de P e S de todos os componentes, segundo a equação 32:

Equação 32:

$$IC_P = [(NCF_{P\ sup} + NCF_{P\ inf}) / 2] / [NCF_{P\ inf} + (NCF_{P\ sup} - NCF_{P\ inf}) / 60 \times P_{rem60}]$$

em que

IC_P = índice de correção dos teores de P dos componentes.

O IC_P corresponde à divisão do NCF_P médio pelo NCF_P estimado (calculado no denominador da equação 32, o qual corresponde à equação 24). O NCF_P médio é a média aritmética entre os limites inferior e superior da faixa de níveis críticos foliares de P. O teor de P corrigido, em cada tipo de componente considerado para o cálculo da demanda, será obtido pela divisão do teor não corrigido pelo IC_P . O mesmo raciocínio se aplica ao S, calculando-se o índice de correção dos teores de S dos componentes (IC_S).

Se o usuário do sistema optar por utilizar teores específicos de P e S, fornecidos por ele em substituição aos teores padrões, pode-se supor que ele possua informações que já incorporam fatores locais de variabilidade, incluindo a FCP. Sendo assim, nesses casos o sistema não utilizará a correção pelo IC_P ou IC_S .

4.1.6 Cálculo da demanda de nutrientes

O passo seguinte para o cálculo da demanda de nutrientes é a determinação da quantidade de matéria seca de CE e DC:

Equação 33: $MS_{CE} = \text{Produt}_{CE} - (\text{Produt}_{CE} \times U_{CE})$

Equação 34: $MS_{DC} = (MS_{CE} / IC) - MS_{CE}$

em que

MS_{CE} = matéria seca de componente exportado (kg ha^{-1});

Produt_{CE} = produtividade esperada (kg ha^{-1} de CE);

U_{CE} = umidade do componente exportado (g kg^{-1});

MS_{DC} = matéria seca de demais componentes (kg ha^{-1});

IC = índice de colheita, expresso em valores decimais.

Verifica-se que a quantidade de matéria seca de CE é calculada em função da meta de produtividade, ou 'produtividade almejada', descontando-se a umidade.

Em seguida, podem ser calculadas as quantidades de nutrientes imobilizadas na cultura. As equações propostas para isso utilizam o teor do nutriente nos tipos de componentes, diferentemente dos estudos do FERTICALC, que utilizaram o índice de eficiência de utilização do nutriente (EUN). A sugestão, portanto, é que o sistema genérico seja configurado para trabalhar com teores e não com EUN. Justifica-se essa sugestão pelo fato de os profissionais não especialistas, que serão a maioria dos usuários do sistema, serem mais familiarizados com a noção de teor, pois os teores, e não o EUN, são encontrados nos resultados laboratoriais e publicações técnicas. As telas do sistema informatizado deverão ser configuradas, portanto, para receberem teores e a simples inversão desses teores nos cálculos internos do sistema seria um passo adicional desnecessário. Além disso, a correção das quantidades de nutrientes imobilizadas nas culturas, pela taxa de recuperação dos nutrientes pelas plantas, conforme sugestões a seguir, já contempla a mesma noção de eficiência obtida com a utilização do EUN.

As equações a seguir fornecem resultados de quantidades já classificadas como 'exportada' e 'não exportada', além da soma das duas, que fornece a quantidade total:

$$\text{Equação 35: } QNut_{i,CE} = MS_{CE} \times Teor_{i,CE} / 1000$$

Equação 36:

$$QNutExpAd_i = \sum (MS_{DC} \times (CoAloc_j / 100) \times (Teor_{ij} / 1000)), \forall ExpAd_j = 1$$

Equação 37:

$$QNutNExp_i = \sum (MS_{DC} \times (CoAloc_j / 100) \times (Teor_{ij} / 1000)), \forall ExpAd_j = 0$$

$$\text{Equação 38: } QNutExp_i = QNut_{i,CE} + QNutExpAd_i$$

$$\text{Equação 39: } QTotNutCult_i = QNutExp_i + QNutNExp_i$$

em que

i = nutriente i;

j = tipo de componente j;

$QNut_{i,CE}$ = quantidade do nutriente i no componente exportado, em $kg\ ha^{-1}$;

$Teor_{i,CE}$ = teor do nutriente i no componente exportado, em $g\ kg^{-1}$;

$Teor_{ij}$ = teor do nutriente i no componente j, em $g\ kg^{-1}$;

$QNutExpAd_i$ = quantidade do nutriente i de exportação adicional;

$CoAloc_j$ = coeficiente de alocação percentual da matéria seca para o componente j;

$ExpAd_j$ = variável 'dummy' que especifica se o componente foi designado pelo usuário como exportação adicional (valor = 1) ou não (valor = 0);

$QNutExp_i$ = quantidade exportada do nutriente i, em $kg\ ha^{-1}$;

$Q_{NutNExp_i}$ = quantidade não exportada do nutriente i , em $kg\ ha^{-1}$;
 $Q_{TotNutCult_i}$ = quantidade total imobilizada pela cultura do nutriente i , em $kg\ ha^{-1}$.

4.1.7 Cálculo da quantidade de nutrientes requerida no solo

A quantidade total do nutriente imobilizada na cultura é uma fração do disponível no solo, já que a planta não aproveita todo o disponível. Corrigindo-se a quantidade imobilizada com a taxa de recuperação do nutriente do solo pela planta, obtém-se uma estimativa da quantidade que deve haver disponível no solo para alcançar a meta de produtividade estabelecida:

Equação 40: $Q_{NutReq_i} = Q_{TotNutCult_i} / (TxRec_i / 100)$

em que

Q_{NutReq_i} = quantidade requerida no solo do nutriente i , em $kg\ ha^{-1}$;
 $TxRec_i$ = taxa de recuperação do nutriente i , em %.

Conforme já discutido (item 3.3.2.1), a taxa de recuperação do nutriente do solo pela planta, para cada nutriente e cultura, deverá ser alvo de cuidadoso levantamento de informações para se obterem valores padrões a serem sugeridos ao usuário como primeira aproximação. Na configuração do sistema de cálculo, deverá ser permitido ao usuário alterar esses valores, mas apenas dentro de certos limites, de modo a se evitarem recomendações errôneas.

Baseando-se nos estudos realizados para as diversas culturas no FERTICALC, sugerem-se as seguintes generalizações a serem adotadas na configuração do sistema genérico:

a) para o P: a expectativa teórica é que em solos muito argilosos e mais intemperizados (menor P remanescente), a taxa de recuperação de P pela planta esteja em torno de 5% e que em solos arenosos esta taxa não exceda 20% (Muniz, 1983 e Fonseca, 1987, citados por Freire, 2001). Assim, sugere-se que a taxa de recuperação varie entre 5 e 20%, dependendo do valor de P remanescente do solo. Os valores intermediários serão determinados pela equação 41, que assume uma relação linear entre a taxa de recuperação e o valor de P remanescente. Assim, o coeficiente 0,25, nessa equação, é proveniente da divisão da amplitude entre os

limites 5 e 20 pela amplitude dos valores possíveis de P remanescente $[(20-5) / (60-0)]$.

Equação 41: $TxRec_P = 5 + 0,25 \times P_{rem60}$

em que

$TxRec_P$ = taxa de recuperação de P pela planta, em %;

P_{rem60} = P remanescente, em $mg\ L^{-1}$.

b) para os demais nutrientes, utilizar o 'escopo da variabilidade'²⁷ indicado no quadro 22. Os valores mínimos e máximos para cada nutriente, bem como os motivos de redução e aumento, foram baseados nos estudos realizados para o FERTICALC e se constituem em sugestões iniciais que deverão ser aprimoradas no futuro.

Quadro 22. Escopo da variabilidade para taxa de recuperação de nutrientes pela planta

Nut.	Mínimo	Máximo	Tendência	
	%		redução	aumento
N	50,0	90,0	Maior produtividade	Menor produtividade
K	40,0	90,0		
Ca	25,0	60,0		
Mg	25,0	80,0		
S	10,0	80,0		

4.2. Cálculo do suprimento de nutrientes

4.2.1 Suprimento de N pelo solo

Embora existam diversos modelos propostos para estimar a dinâmica da mineralização de N orgânico do solo, verifica-se que esses modelos são de complexidade tal que os torna inadequados para utilização em um sistema de recomendações a ser utilizado por não especialistas (Silva & Resck, 1997, Camargo et al., 1999 e Leal & De-Polli, 1999). A principal limitação é a exigência, para os cálculos, de informações que não são facilmente acessíveis aos profissionais não especializados, tais como a natureza e quantidade dos vários grupos de substâncias

²⁷ Ver nota de rodapé número 20

nitrogenadas da matéria orgânica do solo, biomassa microbiana, dados climáticos diários, dentre outros.

A sugestão para construção do sistema proposto é a utilização, pelo menos nas fases iniciais de seu desenvolvimento, de cálculos mais simplificados, capazes de prover estimativas para a disponibilização de N pelo solo que, embora possam ser consideradas, devido à simplificação, de menor exatidão que aquelas provenientes de modelos dinâmicos mais complexos, são realísticas do ponto de vista de prática agrônômica.

Tendo em vista tal sugestão, será computado o N proveniente da mineralização da matéria orgânica, assumindo-se que esta possua uma relação C/N de 10/1. A quantidade assim calculada será considerada como o estoque total de N do solo, que em uma primeira versão do sistema será assumido como sendo totalmente disponível à mineralização. Uma parte do estoque total pode ser mineralizada anualmente, o que é definido por um 'taxa de mineralização anual de N', cujo escopo está definido no quadro 23.

Quadro 23. Escopo da variabilidade para taxa de mineralização anual do N da matéria orgânica ($TxMinN_{anual}$ da equação 42)

Mínimo	Máximo	Tendência		
		Fator	Redução	Aumento
1,0	5,0	Pluviosidade	Regiões mais secas	Regiões mais úmidas
		Tipo de solo	Solos argilosos compactados	Solos arenosos ou argilosos sem problemas de compactação
			Solos rasos ou mal drenados	Solos profundos e bem drenados
		Manejo do solo	Plantio direto	Preparo convencional
			Sem calagem recente	Calagem recente na área (12 a 24 meses)
			Sem pousio ou reforma recente de pastagem	Pousio ou reforma recente de pastagem
			Áreas de uso antigo	Áreas recém-desbravadas
			Sem aplicações freqüentes de adubos orgânicos	Com aplicações freqüentes de adubos orgânicos
			Uso contínuo de culturas não leguminosas	Uso recente de leguminosas em rotação

Como já discutido, não é adequado se considerar que a taxa anual seja uniformemente distribuída em todos os meses. Se assim fosse, uma cultura anual, por exemplo, ocupando a área por quatro meses, teria acesso a um terço do N

potencialmente mineralizável. No entanto, se esse período de quatro meses ocorre na época de maior atividade microbiana no solo, o que geralmente corresponde ao período de maior temperatura e pluviosidade, é razoável a suposição de que uma parte maior do que um terço do total esteja acessível à cultura nesse período.

Sugere-se, assim, que a taxa de mineralização em cada mês seja considerada uma fração da taxa anual proporcional à atividade microbiana do solo naquele mês. Como a atividade microbiana no solo é fortemente influenciada pela temperatura e água disponível no solo e considerando-se que a 'evapotranspiração real' (ER) é capaz de integrar convenientemente esses dois fatores (Vianello & Alves, 1991), assume-se que a proporção 'valor mensal/valor anual', nas mesmas condições ambientais, seja a mesma para as duas características. Como consequência, a taxa mensal de mineralização do N no mês, pode ser calculada aplicando-se, à taxa anual, a proporção entre a ER no mês e a ER anual:

$$\text{Equação 42: } \text{TxMinN}_i = \text{TxMinN}_{\text{anual}} \times [\text{ER}_i / \sum(\text{ER}_i)]$$

em que

TxMinN_i = taxa de mineralização do N no mês i, em %;

$\text{TxMinN}_{\text{anual}}$ = taxa de mineralização anual do N, definida pelo usuário conforme o escopo de variabilidade do quadro 23, em %;

ER_i = estimativa da evapotranspiração real no mês i, em mm;

$\sum(\text{ER}_i)$ = somatório da evapotranspiração de cada mês, cujo total é a evapotranspiração real anual, em mm.

A escolha da ER como moduladora da taxa mensal de mineralização deve-se ao fato de essa característica climática levar em consideração a temperatura média mensal e a água disponível no solo (Vianello & Alves, 1991), dois importantes fatores reguladores da atividade microbiana. De acordo com esses autores, o cálculo de ER exige, primeiramente, uma estimativa da evapotranspiração potencial (EP), a qual é *“a quantidade de água evapotranspirada na unidade de tempo por uma cultura verde, de pequeno porte, cobrindo completamente o solo, de altura uniforme e não submetida a quaisquer restrições de água”*. Equações que utilizam a temperatura média mensal são usadas para estimar EP mensal e, pela soma dos índices mensais, EP anual.

O conceito de EP, portanto, é indissociável da disponibilidade plena de água no solo, razão pela qual se optou pela evapotranspiração real. A disponibilidade real de água no solo determina a ER, pois enquanto houver água disponível, ou seja, a

quantidade armazenada no perfil for igual à capacidade de campo, a evapotranspiração ocorrerá na taxa potencial (EP). Nos meses em que houver déficit de água, ER será menor que EP.

Verifica-se, em termos de configuração do sistema, que a adoção de ER como moduladora da taxa de mineralização mensal implica a necessidade de construir um módulo de cálculos auxiliar para realizar um balanço hídrico, ainda que parcial, para a região para a qual se realiza a recomendação de adubação. Os cálculos necessários para o balanço hídrico são descritos em Vianello & Alves (1991) e poderão ser facilmente configurados no sistema. Os dados climáticos regionais necessários são as temperaturas médias mensais, as precipitações médias mensais e a latitude local. O usuário poderá utilizar dados climáticos próprios, mas, na falta desses, o sistema poderá indicar os dados de postos meteorológicos mais próximos, obtidos na publicação “Normais Climatológicas Brasileiras (1961-1990)”, do Instituto Nacional de Meteorologia²⁸.

As informações de solo necessárias para o balanço hídrico são a profundidade de exploração efetiva das raízes, a capacidade de campo, o ponto de murcha permanente e a densidade do solo. Como estas não são informações comuns em laudos de análises de solo rotineiras, o sistema deverá conter informações padrões genéricas, por grupo de solos, que podem facilmente ser obtidas nos relatórios de levantamentos pedológicos.

Sendo assim, a quantidade de N proveniente da mineralização da matéria orgânica em um determinado mês será calculada da seguinte forma:

$$\text{Equação 43: } QN_{MOi} = [(TeorMO / 1,724 / 10) \times Prof \times 1000] \times (TxMinN_i / 100)$$

em que

QN_{MOi} = quantidade de N proveniente da mineralização da matéria orgânica no mês i, em $kg\ ha^{-1}$;

TeorMO = teor de matéria orgânica do solo, em $dag\ kg^{-1}$;

Prof = profundidade da camada considerada, em cm;

²⁸ Esses dados correspondem às médias das observações realizadas no período de 30 anos, em mais de 200 postos meteorológicos distribuídos em todo o território nacional. Foram publicados pelo INMET apenas em versão impressa, mas existe disponível na Internet uma versão digitalizada (<http://www.magister.srv.br/download/instnorm.exe>), que pode servir como fonte de informações para o sistema.

Na equação 43, a divisão do teor de matéria orgânica por 1,724 visa obter o teor de C, pois assume-se que a matéria orgânica contém 58 % de C. Como assume-se também uma relação C/N de 10/1 para a matéria orgânica, divide-se o teor de C por 10 para obter o teor de N.

A quantidade de N proveniente da matéria orgânica será, então, a soma das quantidades calculadas para cada mês de ocupação da cultura na gleba, durante os quais há absorção de nitrogênio. Não será considerado, portanto, todo o ciclo da cultura, mas apenas o período de absorção de nitrogênio, o que varia conforme a cultura. O mesmo se aplica para culturas perenes, o que normalmente corresponde aos períodos de florescimento, crescimento e maturação dos frutos.

O cálculo proposto na equação 43 pode ser utilizado também para estimativas do suprimento de outros nutrientes pela matéria orgânica do solo, bastando alterar a constante que relaciona o teor de C com o teor do nutriente (10, no caso do N).

4.2.2 Suprimento de P, K e S pelo solo

Como já comentado, o cálculo do suprimento desses nutrientes no sistema FERTICALC consiste em transformar a quantidade do nutriente requerida no solo em um nível crítico do nutriente no solo (NC ideal) e verificar a diferença entre NC ideal e o teor atual do nutriente. Eventuais diferenças positivas são novamente transformadas em quantidade de nutriente a aplicar. Para todos os nutrientes, com exceção do N, utilizaram-se, nos trabalhos relacionados ao FERTICALC, relações entre o nutriente recuperado pelo extrator e o aplicado ao solo, chamadas de ‘taxa de recuperação do extrator’, para a conversão de quantidades em NC e vice-versa.

Algumas das culturas já estudadas no sistema FERTICALC, como milho, soja, café e cana-de-açúcar, estão entre as que mais foram pesquisadas no Brasil. Não obstante, os autores dos respectivos trabalhos do FERTICALC foram unânimes em afirmar que o cálculo do suprimento de nutrientes pelo solo pela taxa de recuperação do extrator é um processo que carece de aprimoramento, pelo fato de os resultados experimentais consultados para obter essa taxa serem pouco representativos ou por serem oriundos de experimentos que não foram delineados especificamente para essa finalidade. Em alguns casos, os autores se viram obrigados a utilizar dados provenientes de experimentos em casa-de-vegetação.

Essa dificuldade, portanto, será ainda maior quando se procurar obter essa taxa para as demais culturas, na construção do sistema genérico. Por isso, a

abordagem que se propõe no presente trabalho, para o cálculo do suprimento de K, P e S pelo solo, é diferente do que foi adotado no sistema FERTICALC até agora.

No sistema genérico, os resultados da análise de solo para P, K e S serão considerados como 'índices de suficiência' (IS), conforme já discutido (item 3.2.1.2). Para relacionar IS com a quantidade de nutriente suprida pelo solo, assume-se a pressuposição de que quando se obtém a 'produtividade potencial' de uma cultura, o solo foi capaz de atender a toda a demanda pelo nutriente e, portanto, a quantidade absorvida na 'produtividade potencial' corresponde ao 'suprimento potencial' do solo, que nesse caso, apresentaria o teor do nutriente correspondente a $IS = 100 \%$. Teores abaixo desse causam redução na produtividade, ou seja, nesse caso, IS é inferior a 100% e o suprimento atual do nutriente pelo solo é calculado, então, pela aplicação desse valor percentual, IS atual, sobre a quantidade de nutriente demandada pela cultura para a 'produtividade potencial' (definida no item 4.1.3 e mais detalhada no texto que se segue).

Verifica-se, portanto, a necessidade de se calcular a demanda de nutrientes para a 'produtividade potencial', a qual será feita exatamente como já descrito para o cálculo da demanda para a 'produtividade almejada' (item 4.1 e seus subitens).

A expressão matemática do cálculo do suprimento é a seguinte:

$$\text{Equação 44: } Q_{\text{Nut}_P\text{Sup}} = Q_{\text{Nut}_P\text{Dem}_{\text{ProdPot}}} \times IS_P / 100$$

em que

$Q_{\text{Nut}_P\text{Sup}}$ = quantidade de P suprida pelo solo, em kg ha^{-1} ;

$Q_{\text{Nut}_P\text{Dem}_{\text{ProdPot}}}$ = quantidade demandada pela cultura na produtividade potencial, calculada conforme descrito no item 4.1 e seus subitens, em kg ha^{-1} ;

IS_P = índice de suficiência de P, calculado para o teor atual do nutriente na análise de solo da gleba, em %.

A mesma expressão, com as devidas adaptações, aplica-se aos nutrientes K e S.

O problema que se apresenta, então, é a estimativa de IS correspondente ao teor atual da análise de solo da gleba. Para isso, podem ser utilizadas equações quadráticas ajustadas com índices interpretativos regionais, a exemplo daquelas mostradas nos quadros 5 e 6. Quando não houver disponibilidade de informações desse tipo, propõe-se a utilização da relação genérica representada pela equação 45:

Equação 45:

$$IS = 100 - \frac{100 - IS_0}{e^{(fm(R_{at} \div R_{100} \times 100)^{0,9})}}$$

em que

IS = índice de suficiência referente ao resultado da análise de solo da gleba para P, K ou S, em %;

IS₀ = índice de suficiência referente ao teor zero, em %;

fm = fator de modificação da forma da curva, variando entre 0,04 e 0,06;

R_{at} = Resultado atual da análise de solo da gleba;

R₁₀₀ = Resultado da análise referente à produtividade potencial.

Com a utilização da equação 45 para estimar o IS para a gleba, as informações necessárias para especificar localmente o modelo são apenas três:

a) o parâmetro IS₀, que corresponde à relação percentual entre a produtividade mínima (quando o teor no solo tende para zero) e a produtividade potencial;

b) o parâmetro R₁₀₀, que corresponde ao teor do nutriente no solo referente à produtividade potencial, e

c) O parâmetro 'fm', variando entre 0,04 e 0,06 que permite ao usuário modificar o formato da curva para refletir a realidade da cultura e região, cujo escopo de variabilidade está sugerido no quadro 24.

A equação 45 garante um formato adequado da curva de relação entre o resultado da análise de solo da gleba e IS, quando 'fm' varia entre 0,04 e 0,06 (Figura 12). Deve-se notar que valores de 'fm' fora do intervalo recomendado (menores que 0,04 ou maiores que 0,06) modificam a forma da curva de maneira inadequada para a estimativa de IS. Quando o teor no solo tende para zero, o denominador da equação tende para 1,0 e, portanto, o valor de IS calculado, nesse caso, será aquele determinado pelo parâmetro IS₀. Por outro lado, quando o teor no solo se aproxima daquele designado como necessário para a produtividade potencial (R₁₀₀), o denominador da equação tende para infinito, com IS tendendo para 100%.

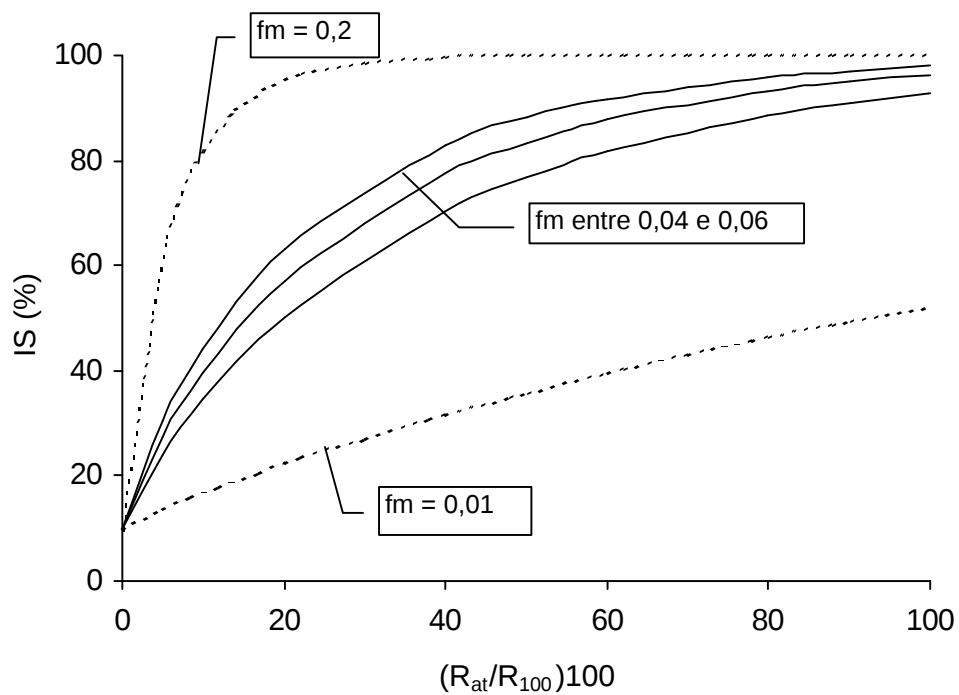


Figura 12. Exemplo de utilização da equação 45, considerando $IS_0 = 10\%$ e variação de 'fm'.

Além de 'fm', existe a possibilidade de mudar o formato da curva alterando o valor de IS_0 (Figura 13).

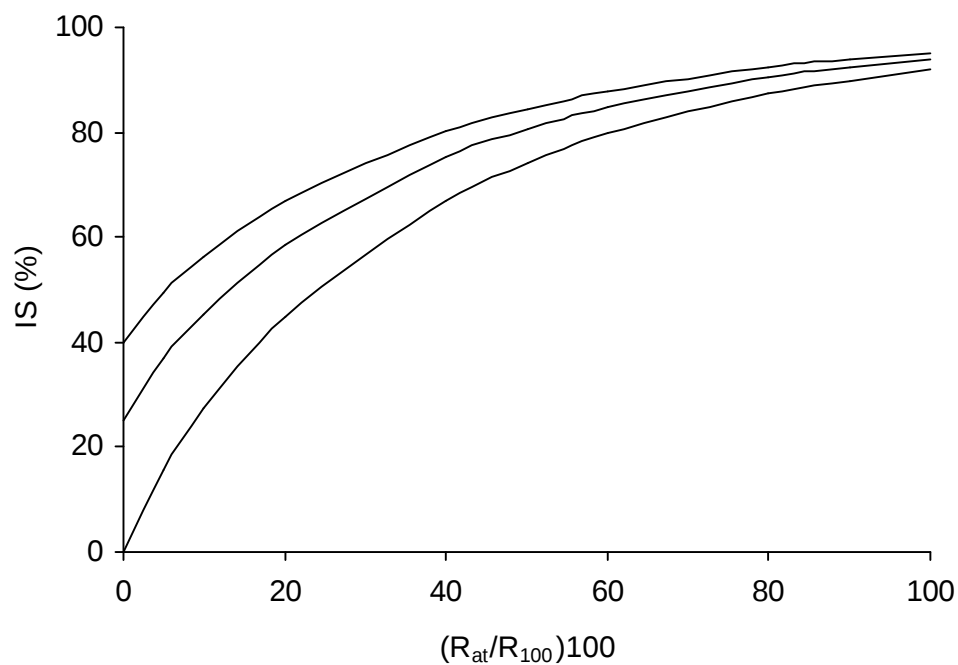


Figura 13. Exemplo de utilização da equação 45, considerando um valor de 'fm' de 0,04 e variando IS_0 (0, 25 e 40%).

Quadro 24. Escopo de variabilidade do parâmetro 'fm' da equação 45

Mínimo	Máximo	Tendência	
		Redução	aumento
0,04	0,06	- solos recentemente incorporados ao processo produtivo, cuja correção ainda não está consolidada; - solos com problemas significativos de deficiência de outros nutrientes que não o nutriente em questão; - baixos níveis tecnológicos do produtor, sujeitando a perdas de produtividade por outros fatores que não o nutriente em questão; - maior dependência de fatores climáticos (não irrigado, por exemplo); - culturas de ciclo curto, como hortaliças, anuais e perenes nos períodos de formação;	- solos corrigidos; - solos sem problemas significativos de deficiência com qualquer nutriente, ou seja, pode ser considerado de fertilidade equilibrada; - altos níveis tecnológicos do produtor; - menor dependência de fatores climáticos, como cultivos irrigados e protegidos ou região de clima mais estável; - culturas perenes no período de produção;

Fica evidente, assim, a grande importância da escolha adequada da 'produtividade potencial', pois será ela a balizadora do suprimento dos nutrientes P, K e S pelo solo. Ao modificá-la, altera-se o cálculo da demanda por nutrientes na produtividade potencial, que servirá de base para o cálculo do suprimento, modulado pelo IS estimado para a gleba. Portanto, com a modificação conjunta desses valores ('produtividade potencial', IS_0 e fm), o usuário tem amplas possibilidades para especificação de condições particulares.

Como corolário da utilização da 'produtividade potencial' como balizadora do suprimento de nutrientes pelo solo, assume-se que a disponibilidade de nutrientes não é uma característica intrínseca do solo, mas, antes, depende da interação entre esse e a planta, o que é o conceito original de disponibilidade (Black, 1993). Nesse ponto, não há diferença na abordagem aqui proposta e o FERTICALC, pois quando, nesse último, se utiliza uma taxa de recuperação do extrator específica da cultura, está sendo assumida a mesma pressuposição.

Essa abordagem se aproxima daquela adotada no sistema 'QUEFTS', descrita no item 3.2.2, segundo o qual o suprimento potencial de um dado nutriente pode ser obtido indiretamente pela determinação da quantidade absorvida pela cultura em experimentos de fertilização nos quais todos os fatores, exceto o nutriente medido, sejam fornecidos de forma não limitante. Outros fatores que não o

suprimento de nutrientes, como disponibilidade de água e estrutura do solo, devem estar também otimizados. A condição 'exceto o nutriente medido' se explica pelo fato de o sistema 'QUEFTS' diferenciar o 'suprimento potencial' do 'suprimento real', sendo esse último consequência da interação dos nutrientes entre si. Portanto, na estimativa do suprimento potencial de um nutriente considera-se que os demais nutrientes estão otimizados.

O 'QUEFTS', idealizado para a cultura do milho, utiliza relações empíricas para estimar diretamente o suprimento potencial do nutriente a partir dos resultados da análise do solo, relações essas que foram baseadas em um pequeno número de experimentos específicos para essa cultura (Janssen et al., 1990). Experimentos semelhantes são necessários quando se deseja aplicar o sistema 'QUEFTS' para outras regiões e, ou, culturas (Wade et al., 1998; Wang et al., 2001; Regmi et al., 2002; Haefele et al., 2003 e Binder et al., 2002). Em outras palavras, a moldura de cálculo do 'QUEFTS' não é diretamente aplicável para condições diferentes daquelas para as quais ela tenha sido previamente parametrizada. No sistema aqui proposto, embora as relações entre o resultado analítico e IS sejam estimadas de forma mais simples, permite-se a utilização de conhecimentos prévios de produtores, pesquisadores e extensionistas para a especificação de condições locais.

De forma semelhante ao 'QUEFTS', a 'produtividade potencial' no sistema aqui proposto deve refletir a produtividade possível da cultura quando não ocorrem quaisquer limitações nutricionais ou de excesso de acidez ou alcalinidade e todos os demais fatores que interferem na produtividade estão otimizados. Não serão consideradas, pelo menos numa primeira etapa de desenvolvimento do sistema, as interações nutricionais, como se faz no 'QUEFTS'. É natural cogitar-se que experimentos de adubação com doses de macronutrientes, com delineamento fatorial, sejam uma boa fonte de informações para o estabelecimento de valores padrões para a 'produtividade potencial' no sistema. No entanto, devido aos artificialismos impostos pela prática experimental, as produtividades nesses experimentos podem não refletir a realidade da cultura na região (Black, 1993). É preferível, assim, contar também com informações de produtores e extensionistas com larga experiência com a cultura na região, além da opinião de especialistas.

Não se deve confundir a 'produtividade potencial', conforme descrito aqui, com o potencial genético de produtividade da cultura, embora essa também esteja condicionada à inexistência de fatores desfavoráveis.

Como já discutido (item 3.3), uma das premissas adotadas por Novais & Smyth (1999) para o delineamento do FERTICALC, é que a saída de nutrientes seja calculada levando-se em consideração a produtividade da cultura, e, portanto, se essa aumentar, a demanda também será maior, tornando o cultivo mais dependente dos fertilizantes. Conseqüentemente, o sistema deve recomendar doses variáveis com a produtividade. O cálculo de suprimento aqui proposto atende a essa premissa, pois se o usuário, ao realizar uma recomendação, especificar uma 'produtividade almejada' próxima da 'produtividade esperada' (ver distinção no item 4.1.3), a necessidade de suplementação com fertilizantes será pequena e crescerá à medida que a 'produtividade almejada' se aproximar da 'produtividade potencial' (Figura 14).

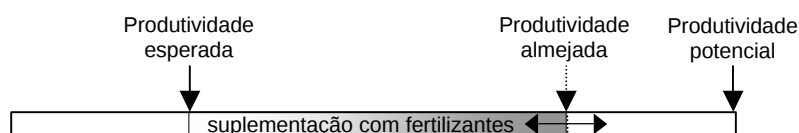


Figura 14. Diagrama que demonstra que com o sistema aqui sugerido a necessidade de suplementação com fertilizantes cresce à medida que a 'produtividade almejada' se aproxima da 'produtividade potencial'.

4.2.3 Ca, Mg e calagem

A prática de fertilização das culturas não inclui, em geral, o fornecimento específico dos nutrientes Ca e Mg, embora seja comum sua adição como componente secundário de alguns fertilizantes, principalmente os fosfatados. Além disso, a aplicação de materiais corretivos ao solo, sendo o mais comum o calcário, acrescenta quantidades de Ca e Mg que, somadas àquelas naturalmente existentes no solo, resultam em quantidades estocadas no solo que são muito superiores à necessidade das culturas em geral, principalmente considerando-se a parte que é exportada, geralmente uma pequena fração do que é absorvido pela cultura. Por exemplo, cada 1.000 kg ha⁻¹ de calcário dolomítico contendo 38% de CaO e 12 % de MgO, adiciona cerca de 270 e 71 kg ha⁻¹ de Ca e Mg ao solo. Cada 1 cmol_c dm⁻³ de Ca na camada de 0 a 20 cm de profundidade correspondem a cerca de 400 kg ha⁻¹ de Ca e cada 1 cmol_c dm⁻³ de Mg correspondem a cerca de 240 kg ha⁻¹ de Mg.

Dessa forma, no sistema genérico, a recomendação de calagem será realizada da maneira usual, isto é, visando à correção de eventuais teores tóxicos de Al trocável e, ou, a elevação da saturação por bases, seguindo-se os métodos de

cálculo indicados pela pesquisa para a região, como em Alvarez & Ribeiro (1999), Raij et al. (1996) e Comissão (1994).

No entanto, deverão ser considerados nos cálculos de adubação as quantidades dos nutrientes Ca e Mg exportadas e eventualmente adicionadas como parte dos fertilizantes aplicados e das quantidades, para que seja possível o monitoramento da sustentabilidade do sistema agrícola, conforme já descrito (item 3.3.2.3).

4.2.4 Recomendações de plantio para culturas perenes

Seguindo indicações de Novais & Smyth (1999), os trabalhos do FERTICALC relacionados a culturas perenes, exemplificados pelo FERTICALC-Café (Prezotti et al., 2000 e Prezotti, 2001), modelaram a recomendação de adubação de substratos para a produção de mudas e adubação das covas na implantação da cultura no campo.

Não obstante o sucesso desse esforço, consubstanciado na elaboração de modelos com boa base teórica e prática e que foram muito apropriadamente incluídos em aplicativos construídos especificamente para essas culturas, podem-se prever grandes dificuldades na configuração de recomendações tão minuciosas e específicas, tendo em vista as necessidades e características de um aplicativo de computador que se pretende seja genérico, isto é, cuja estrutura seja aplicável a culturas agrícolas muito diferentes entre si, como é o caso do sistema aqui sugerido.

A configuração de tais recomendações não é impossível do ponto de vista de programação de computadores, mas demandaria um esforço adicional de desenvolvimento da estrutura do aplicativo que é desproporcional ao benefício que será alcançado com tais especificidades.

Em outras palavras, acredita-se que as recomendações de adubação genéricas, atualmente disponíveis, para substratos para produção de mudas e para adubação de covas de plantio de culturas perenes, representam uma boa aproximação do ponto de vista nutricional e pouco interferem na economicidade da exploração como um todo e eventuais benefícios de recomendações mais detalhadas não justificam o esforço extra necessário para sua configuração no aplicativo genérico. Não se discute o mérito dos modelos do FERTICALC para recomendações específicas, e acredita-se que muito contribuirão para aprimorar o manejo nutricional das culturas a que se destinam, mas sugere-se postergar a

implementação desses modelos específicos para etapas posteriores do desenvolvimento do sistema genérico.

Dessa forma, o sistema genérico, na versão inicial, deverá sugerir ao usuário os cuidados tradicionais para adubação de covas de forma indistinta para as culturas. Esses cuidados consistem, basicamente, na utilização de mistura da terra da cova com adubos orgânicos bem curtidos e adubos químicos fosfatados e potássicos, além de calcário e sais de micronutrientes. Além disso, os cuidados indicados para a implantação de culturas perenes não podem deixar de incluir a verificação da necessidade de calagem, calculada pelos métodos oficialmente adotados.

4.2.5 Suprimento de nutrientes pela adição de adubos orgânicos e,ou restos de culturas anteriores

Para que seja considerada a oferta de nutrientes provenientes de materiais orgânicos de origem externa à gleba, é necessário distinguir-se entre materiais frescos e 'curtidos' (humificados), além das informações referentes à composição do material, em termos de umidade e nutrientes. Propõe-se que os materiais humificados sejam considerados como parte da matéria orgânica do solo e o suprimento de nutrientes por essa fonte seja, então, calculado da mesma forma proposta para o suprimento de N (item 4.2.1), ou seja, será considerada, para esse material, a mesma taxa de decomposição anual adotada para o N proveniente da matéria orgânica do solo (Quadro 23) e a taxa de mineralização mensal estimada pela equação 42. No caso da adição de materiais frescos, o cálculo será feito conforme descrito a seguir, para restos de culturas.

O cálculo do suprimento de nutrientes por restos da cultura anterior é facilitado pelo fato de o sistema já conter as informações necessárias para tal, como a distribuição percentual da matéria seca entre os diversos componentes estruturais da planta e a composição de umidade e nutrientes (item 4.1). Basta que o usuário estabeleça a cultura anterior e a produtividade alcançada, ou isso pode ser inferido das informações armazenadas para a gleba.

A partir da lista de culturas contempladas no sistema, estipulada no quadro 13, o sistema estabelece, automaticamente, a lista dos componentes das plantas que fazem parte de restos de cultura, os quais estão na coluna 'Demais componentes' desse quadro e, para cada um deles, estabelece o percentual que

estará decomposto anualmente (Quadro 25). Sugere-se que em cada recomendação sejam considerados os nutrientes provenientes da parte decomposta apenas no primeiro ano, pois embora seja possível configurar o sistema de modo a manter um controle do material acumulado em cada gleba pela sucessão das culturas, essa configuração aumentaria muito a complexidade do sistema sem que isso represente um ganho significativo na exatidão das recomendações, já que os materiais de mais difícil decomposição, como caules lenhosos, são pobres em nutrientes.

Quadro 25. Tipo de componentes que compõem os restos culturais e sugestão para sua taxa de decomposição anual

Tipo de Componente	Percentual de decomposição no primeiro ano
Bulbos	100
Caules	10
Colmos	50
Estipes	50
Folhas	100
Frutos	100
Inflorescências	100
Pseudocaules	100
Raízes	50
Ramos	80
Rizomas	50

4.3. Cálculo da dose de nutriente a aplicar

O cálculo final da dose de nutriente a aplicar pode ser descrito como:

$$\text{Equação 46: } Q_{\text{Nut}_{\text{fert}}} = [Q_{\text{NutDem}} - (Q_{\text{NutSup}} + Q_{\text{Nut}_{\text{ro}}})]$$

em que

$Q_{\text{Nut}_{\text{fert}}}$ = nutriente a ser adicionado na forma de fertilizantes;

Q_{NutDem} = demanda do nutriente pela cultura (Equação 40);

Q_{NutSup} = suprimento do nutriente pelo solo (Equação 44);

$Q_{\text{Nut}_{\text{ro}}}$ = suprimento do nutriente por restos de culturas anteriores e/ou adubos orgânicos (item 4.2.5);

Nos trabalhos relacionados ao FERTICALC, esse também foi o ponto culminante dos cálculos. Não houve preocupação em converter a dose de nutrientes em doses de fertilizantes, assim como isso não é feito em outros sistemas de recomendação, como as tabelas. O aplicativo, no entanto, deve prover ao usuário

facilidades para essa conversão, considerando as diversas possibilidades de adubos simples e formulados NPK, preferencialmente com mecanismos de cálculo de custo mínimo, como o algoritmo de otimização SIMPLEX.

5. Considerações sobre a validação do sistema

5.1. Introdução

O termo ‘validação’, no caso de modelos, tem sido empregado para a comparação dos resultados dos cálculos do modelo com dados observados. Isso se aplica aos chamados modelos de processos, que visam descrever matematicamente um processo fisiológico específico, como a absorção de nutrientes ou o acúmulo de biomassa. Nesse caso, as saídas do modelo são estimativas quantitativas da performance do processo modelado, como resposta a condições pré-determinadas, que podem ser diretamente comparadas a resultados observados. Um mesmo conjunto de resultados observados pode servir de base para comparação de diversas estimativas, o que favorece a análise de sensibilidade das variáveis e parâmetros considerados, permitindo ajustes finos no modelo, embora esse procedimento de ‘tentativa-e-erro’ possa ser criticado como método científico (Passioura, 1996).

No entanto, o cenário dos sistemas de cálculos de adubação difere significativamente do acima descrito. Eles são exemplos de modelos em que se busca simular a performance de um macro-processo, a produtividade econômica da cultura²⁹, que é composto por vários sub-processos, incluindo os de cunho não fisiológico, que dependem de fatores sócio-econômicos. A complexidade desse macro-processo torna inviável sua modelagem detalhada, que considere cada um de seus sub-processos e, assim, em nome da praticidade, substituem-se muitas variáveis e parâmetros por relações empíricas genéricas, tais como a relação entre resultados de análises de solo e produtividade. Se, por um lado, isso facilita a utilização do modelo pelo menor requerimento de dados, por outro, inviabiliza a análise de sensibilidade, pois não se poderá creditar uma diferença entre a estimativa e o resultado observado a uma variável ou parâmetro específico.

Além disso, um sistema de recomendações produz ‘recomendações’ e não previsões de performance da plantação. Trata-se, portanto, de uma interferência no macro-processo, uma variável a mais, cujo efeito será avaliado *a posteriori*, pelos

²⁹ A adjetivação ‘econômica’ da produtividade é necessária no contexto de cálculos de adubação, pois as doses recomendadas devem visar sempre a maximização da lucratividade da aplicação de fertilizantes (item 3.1.1).

resultados de sua implementação, geralmente pela produtividade alcançada e também, no caso do sistema aqui proposto, pela sua influência na tendência de sustentabilidade da exploração agrícola em médio e longo prazo.

Pode-se afirmar, portanto, que a comparação de vários resultados de simulações entre si, como resposta a alterações nas variáveis do sistema, como realizado por Santos (2002) e Oliveira (2002), ou a comparação dos resultados do sistema com outros métodos de cálculos (como as tabelas, por exemplo), não podem ser consideradas como validação. Só se pode falar em validação do sistema quando se puder comparar seus cálculos com os processos pretensamente modelados, no caso, a produtividade das culturas e a tendência na manutenção da fertilidade do solo em longo prazo (sustentabilidade), mas, obviamente, tais critérios extrapolam as possibilidades do presente trabalho.

Tendo em vista o grande número de culturas abordadas no sistema aqui proposto, a experimentação de campo se torna praticamente inviável como fonte de informações para validar o sistema. Além disso, é importante lembrar que é necessário grande esforço prévio, para se obter as informações que servirão como valores padrões no sistema (preenchimento das planilhas sugeridas no item 4.1.4). Acredita-se, portanto, que somente será possível, em médio prazo, pois mesmo isso demandará algum tempo para gerar conclusões, uma validação pelo uso, por meio do monitoramento das recomendações e dos resultados das culturas com usuários e regiões selecionados. No momento, é útil comparar as recomendações elaboradas pelo sistema com outras, provenientes de outros sistemas de cálculos já adotados, verificando-se, assim, não sua correção, mas, pelo menos, sua coerência com o senso comum, balizando, ainda que precariamente, conclusões sobre a adequabilidade do sistema. Esse procedimento de validação está de acordo com o preconizado por Rykiel (1996), para quem validação, em termos de modelagem, não é um procedimento de certificação de uma teoria científica, mas para verificar se o modelo é aceitável para o uso a que se destina, ou seja, se ele satisfaz requisitos específicos. Essa foi a opção adotada em todos os trabalhos relativos ao FERTICALC, nos quais se utilizou a recomendação das tabelas como base de comparação.

No entanto, mesmo que fossem apresentados aqui vários exemplos de cálculos para essas comparações, não seria possível chegar a conclusões definitivas. Isso porque da forma como o sistema foi delineado, o usuário pode alterar os diversos parâmetros e, dessa forma, partindo-se de um mesmo conjunto

de resultados analíticos, diferentes usuários poderão chegar a recomendações diferentes. Considerando-se o número e a variabilidade desses parâmetros, pode-se dizer que há inúmeras possibilidades de recomendações para uma mesma cultura e análise de solo.

Para que seja possível um número razoável de simulações que permitam estudos comparativos mais detalhados, será necessário desenvolver aplicativos de computador baseado no sistema proposto.

Sendo assim, o exemplo de cálculo apresentado a seguir tem a finalidade apenas ilustrativa, visando demonstrar o mecanismo de cálculo do sistema.

5.2. Exemplo de cálculo com a cultura da soja

O primeiro passo para os cálculos é o preenchimento da planilha de prospecção de dados (Quadro 26). A especificação da região ou local se faz, principalmente, pela produtividade potencial, que foi estipulada em 3.900 kg ha^{-1} , visando exemplificar a região produtora de soja de Itumbiara-GO. A relação produto/planta e os teores de nutrientes em raízes, caules, ramos e grãos foram obtidos no trabalho de Santos (2002), cujo sistema foi denominado FERTICALC-Soja. Esse autor refere-se aos teores de nutrientes na parte vegetativa como um todo, não especificando componentes, razão pela qual os teores estão repetidos para todos, com exceção das folhas, cujos teores foram simulados a partir dos intervalos de teores foliares considerados adequados para a região, citados por Oliveira (2002).

A 'produtividade almejada' (CE) é de 3.000 kg ha^{-1} . Considerando-se o teor de água do produto, anotado no quadro 26, de 130 g kg^{-1} , a matéria seca de grãos será de 2.610 kg ha^{-1} , o que leva à previsão de que a matéria seca de DC será de $5.546,2 \text{ kg ha}^{-1}$. A matéria seca de grãos corresponde a 30,2 % da matéria seca total (índice de colheita). Esse valor, portanto, foi anotado como a porcentagem de alocação de matéria seca para o componente grão. O restante de 69,8% de massa seca foi distribuído arbitrariamente entre os demais componentes, pois não foram encontradas informações publicadas fornecendo tais parâmetros.

A análise de solo na qual se baseia o presente exemplo de cálculo está descrita no quadro 27.

Quadro 26. Planilha com as informações necessárias para os cálculos com a cultura da soja

Planilha para preenchimento de dados do sistema									
Cultura: <i>Soja</i>									
Grupo: <i>Herbáceas</i>									
Produtividade potencial: 3.900 kg ha^{-1}									
Relação produto/planta: $0,32$									
Umidade do produto: 130 g kg^{-1}									
Acúmulo anual de mat. seca: <i>Não se aplica</i>									
Componente	Tipo	Exp. s/n	Alocação %	N	P	K	Ca	Mg	S
g kg ⁻¹									
Aéreo (em conjunto)	<i>Não se aplica</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Subterrâneo	<i>Raízes</i>	N	11,6	12,6	2,6	11,2	9,3	5,2	1,5
Sust. Primária	<i>Caules</i>	N	34,6	12,6	2,6	11,2	9,3	5,2	1,5
Sust. Secundária	<i>Ramos</i>	N	11,6	12,6	2,6	11,2	9,3	5,2	1,5
Ativ. Metabólica	<i>Folhas</i>	N	11,6	50,0	3,5	22,5	10,0	6,0	3,0
Reprodutivo	<i>Grãos</i>	S	30,6	55,0	6,2	19,8	3,1	2,8	2,8
Extra	<i>Não se aplica</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Taxa de recuperação do nutriente do solo pela planta (%):				80,0	15,2	50,0	35,0	45,0	40,0
Variabilidade de NCF _P é crítica?		☒ S ☐ N	NCF _{P, inf} : 2,5		NCF _{P, sup} : 5,0				
Variabilidade de NCF _S é crítica?		☒ S ☐ N	NCF _{S, inf} : 2,1		NCF _{S, sup} : 4,0				

Quadro 27. Análise de solo para o exemplo de cálculo com a cultura da soja

Característica	Valor	Extrator
pH	4,90	Água (1:2,5)
P (mg dm ⁻³)	1,50	Mehlich-1
K (mg dm ⁻³)	16,00	Mehlich-1
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,60	KCl 1 mol L ⁻¹
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,20	KCl 1 mol L ⁻¹
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,20	KCl 1 mol L ⁻¹
H + Al (cmol _c dm ⁻³)	2,11	Acetato de Ca 0,5 mol L ⁻¹ - pH 7,0
S (mg dm ⁻³)	2,50	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ em HOAc (1:2,5)
P _{rem-60} (mg L ⁻¹)	40,7	CaCl ₂ 10 mmol L ⁻¹ (60 mg L ⁻¹ de P)
M.O. (dag kg ⁻¹)	2,60	Método Walkley-Black

5.3. Correção dos teores de P e S dos componentes

Como a planilha assinala que a variabilidade de NCF_P e NCF_S é crítica, deve ser calculado o índice de correção dos teores de P e S dos componentes, conforme estabelecido no item 4.1.5, pela equação 32:

$$IC_P = [(50 + 25) / 2] / [25 + (50 - 25) / 60 \times 40,7] = 0,89$$

$$IC_S = [(40 + 21) / 2] / [21 + (40 - 21) / 60 \times 40,7] = 0,90$$

Os teores corrigidos encontram-se no quadro 28.

Quadro 28. Teores de P e S dos componentes, corrigidos de acordo com a FCP do solo.

Tipo de componente	P	S
	 g kg ⁻¹	 g kg ⁻¹
Raízes	2,92	1,67
Caules	2,92	1,67
Ramos	2,92	1,67
Folhas	3,93	3,33
Grãos	6,97	3,11

5.4. Cálculo da demanda de nutrientes

Esse cálculo está descrito no item 4.1.6. As quantidades resultantes, mostradas no quadro 29, foram calculadas pela aplicação das equações 35, 38 e 39.

Quadro 29. Quantidade de nutrientes imobilizada pela cultura da soja, estimada conforme descrição no item 4.1.6, pela aplicação das equações 35, 38 e 39.

Quantidade		N	P	K	Ca	Mg	S
..... kg ha ⁻¹		 kg ha ⁻¹	 kg ha ⁻¹	 kg ha ⁻¹	 kg ha ⁻¹	 kg ha ⁻¹	 kg ha ⁻¹
Exportada	Grãos	137,27	17,40	49,42	7,74	6,99	7,76
Não-exportada	Raízes	11,92	2,76	10,60	8,80	4,92	1,58
	Caules	35,56	8,24	31,61	26,25	14,67	4,71
	Ramos	11,92	2,76	10,60	8,80	4,92	1,58
	Folhas	47,31	3,72	21,29	9,46	5,68	3,15
Total		243,97	34,88	123,50	61,04	37,18	18,79

O mesmo cálculo, para o suprimento, seria feito para estimar as quantidades de nutrientes provenientes de restos de culturas anteriores, conforme item 4.2.5. Restaria, após o cálculo da quantidade de nutrientes imobilizada na cultura anterior, utilizar as taxas de decomposição dos componentes no primeiro ano, sugeridas no quadro 25, e aplicar a taxa de mineralização mensal estimada para os meses de ocupação da cultura atual (item 5.6). Essa passagem não está incluída nesse exemplo.

5.5. Quantidade de nutrientes requerida no solo

De acordo com o item 4.1.7, aplicando-se a equação 40, com as taxas de recuperação do nutriente pela planta assinaladas no quadro 26, obtém-se os resultados constantes no quadro 30.

Quadro 30. Quantidades de nutrientes requeridas no solo pela cultura da soja, calculadas conforme descrito no item 4.1.7, aplicando-se a equação 40, com as taxas de recuperação do nutriente pela planta assinaladas no quadro 26.

	N	P	K	Ca	Mg	S
	kg ha ⁻¹					
Quantidade	304,97	229,47	247,01	174,40	82,62	46,96

5.6. Suprimento de N pelo solo

Para aplicação da equação 43 (item 4.2.1), é necessário conhecer o balanço hídrico local (Quadro 31) para determinação da taxa de mineralização de N em cada mês. Segundo CEPAGRI (2002), a época mais favorável para o plantio de cultivares precoces de soja, nesse local, é meados de outubro (10 a 20/10). O ciclo da cultura ocorre, então, entre os meses de outubro e dezembro.

Quadro 31. Balanço hídrico de Itumbiara-GO

Mês	T. Média	Precip.	EP	ER	P-EP	Arm.	Exc.	Def.	Alt.
Jan	24,3	287	84,4	84,4	202,6	125,0	202,6	0,0	0,0
Fev	24,2	254	85,4	85,4	168,6	125,0	168,6	0,0	0,0
Mar	24,6	175	107,5	107,5	67,5	125,0	67,5	0,0	0,0
Abr	23,9	72	109,0	104,0	-37,0	93,0	0,0	5,0	-32,0
Mai	22,3	36	106,5	76,1	-70,5	52,9	0,0	30,4	-40,1
Jun	20,8	11	96,1	37,1	-85,1	26,8	0,0	59,0	-26,1
Jul	20,5	10	99,1	23,7	-89,1	13,1	0,0	75,5	-13,7
Ago	22,8	3	107,4	10,4	-104,4	5,7	0,0	97,0	-7,4
Set	24,0	24	103,7	26,7	-79,7	3,0	0,0	77,0	-2,7
Out	24,9	120	101,1	101,1	18,9	21,9	0,0	0,0	18,9
Nov	24,4	149	84,2	84,2	64,8	86,7	0,0	0,0	64,8
Dez	24,2	211	79,5	79,5	131,5	125,0	93,2	0,0	38,3
Anual	280,9	1352	1163,9	820,1	188,1	803,1	531,9	343,9	0,0

T. Média = temperatura média mensal; Precip. = precipitação pluviométrica mensal (mm); EP = evapotranspiração potencial (mm); ER = evapotranspiração real (mm); P-EP = diferença entre EP e Precip.; Arm. = água armazenada; Exc. = excesso de água; Def. = Déficit de água; Alt. = armazenamento do mês atual em relação ao armazenamento do mês anterior

Com os dados do balanço hídrico, compõe-se o quadro 32, estimando-se a taxa de mineralização mensal do N da matéria orgânica do solo (Equação 42) e aplicando-a à quantidade total de N (Equação 43). Considerou-se a taxa de

mineralização anual de 4,0 %, estimada dentro do escopo de variabilidade definido no quadro 23.

Quadro 32. Estimativa da quantidade de N proveniente da decomposição da matéria orgânica do solo na camada de 0 a 20 cm.

Mês	ER	ER / $\Sigma(ER)$	TxMinN	QN _{MO} (kg ha ⁻¹)
Out	101,1	0,123	0,00492	14,87
Nov	84,2	0,102	0,00408	12,33
Dez	79,5	0,090	0,00360	10,88
Anual	$\Sigma(ER_i) = 820,1$		TxMinN _{anual} = 0,04	QN _{MO} = 38,08

ER = evapotranspiração real (mm); ER / $\Sigma(ER)$ = relação entre ER do mês e o somatório anual de ER; TxMinN = taxa de mineralização no mês; QN_{MO} = estimativa da quantidade de N proveniente da decomposição da matéria orgânica do solo.

Verifica-se que, por esses cálculos, a quantidade de N proveniente da decomposição da matéria orgânica do solo atenderia a uma parcela pequena da necessidade da cultura ($38,08 / 319,16 \times 100 = 11,9 \%$). Resultados semelhantes foram observados em outros trabalhos relacionados ao FERTICALC, que utilizaram modelos de decomposição de N diferentes do adotado no presente trabalho. Prezotti (2001), por exemplo, calculou em 40,6 kg ha⁻¹ o suprimento de N do solo em um período de 24 semanas na cultura do café, para uma demanda de 282 kg ha⁻¹ no mesmo período. Carvalho (2000) calculou um suprimento de 66 kg ha⁻¹ para uma demanda de 239,6 kg ha⁻¹ na cultura do milho. No entanto, o suprimento de N pelo solo estimado nesses trabalhos baseia-se em uma premissa equivocada, conforme discutido no item 3.3.2.2.

Sabe-se que uma quantidade adicional de N é proveniente da decomposição de restos de culturas anteriores (não considerada nesse exemplo) e, eventualmente, da adição de adubos orgânicos (não usual na cultura da soja). A diferença será coberta, no caso da cultura da soja, pela fixação biológica de N₂.

5.7. Suprimento de P, K e S

Seguindo-se o método preconizado no item 4.2.2, é necessário calcular a demanda de nutrientes para a produtividade potencial. Portanto, os mesmos passos executados nos itens 5.4 e 5.5 devem ser feitos com a produtividade potencial de 3.900 kg ha⁻¹. Nesse caso, a previsão é de que a produção de matéria seca total será de 10.603,1 kg ha⁻¹, sendo 3.393,0 kg ha⁻¹ de grãos (CE) e 7.210,1 kg ha⁻¹ de demais componentes (DC).

Os resultados dos cálculos das quantidades de nutrientes imobilizadas na cultura e requeridas no solo, para a produtividade potencial, estão nos quadros 33 e 34.

Quadro 33. Quantidade de nutrientes imobilizada pela cultura da soja para a produtividade potencial de grãos de 3.900 kg ha⁻¹, estimada conforme descrição no item 4.1.6, pela aplicação das equações 35, 38 e 39.

		N	P	K	Ca	Mg	S
Quantidade		kg ha ⁻¹					
Exportada	Grãos	193,26	24,49	69,57	10,89	9,84	10,93
Não-exportada	Raízes	14,83	3,44	13,18	10,95	6,12	1,97
	Caules	44,62	10,34	39,66	32,94	18,42	5,91
	Ramos	14,83	3,44	13,18	10,95	6,12	1,97
	Folhas	58,85	4,63	26,48	11,77	7,06	3,92
Total		326,39	46,33	162,08	77,49	47,56	24,69

Quadro 34. Quantidade de nutrientes requeridas no solo pela cultura da soja para a produtividade potencial de grãos de 3.900 kg ha⁻¹, calculadas conforme descrito no item 4.1.7, aplicando-se a equação 40, com as taxas de recuperação do nutriente pela planta assinaladas no quadro 26.

		N	P	K	Ca	Mg	S
Quantidade		kg ha ⁻¹					
		407,99	304,81	324,17	221,40	105,68	61,73

Para se estimar o suprimento de P, K e S, torna-se necessário obter uma estimativa para o índice de suficiência (IS) dos resultados da análise desses nutrientes, o que é feito pela equação 45. Primeiramente, é necessário estabelecer o resultado de análise referente à produtividade potencial (R₁₀₀). Será considerado o limite inferior da classe de teores classificados como 'Muito bom' por Alvarez et al. (1999), que em um solo com P_{rem-60} de 40,7 mg L⁻¹, para o P é de 33 mg dm⁻³, para o K é de 120 mg dm⁻³ e para o S é de 19,6 mg dm⁻³.

Também é necessário estipular os parâmetros IS₀ e 'fm' da equação 45. Para esse exemplo, serão adotados os valores de IS₀ de 10, 20 e 25% respectivamente para P, K e S, além do valor de 'fm' de 0,04 para todos eles. De acordo com o escopo da variabilidade do parâmetro 'fm' (Quadro 24), adotou-se o menor valor possível (0,04), já que a análise de solo utilizada nesse exemplo (Quadro 27) indica se tratar de um solo ainda não corrigido e com problemas significativos de deficiências nutricionais.

Sendo assim, obtêm-se as seguintes equações para estimativa de IS:

$$IS_P = 100 - \frac{100 - 10}{e^{(0,04 \times (R_{at} \div 33 \times 100)^{0,9})}}$$

$$IS_K = 100 - \frac{100 - 20}{e^{(0,04 \times (R_{at} \div 120 \times 100)^{0,9})}}$$

$$IS_S = 100 - \frac{100 - 25}{e^{(0,04 \times (R_{at} \div 19,6 \times 100)^{0,9})}}$$

Para a análise de solo desse exemplo, portanto, o valor de IS_P é 23,02 %, IS_K é 46,99 % e IS_S é 49,50 %. Pela Equação 44, basta multiplicar a quantidade do nutriente demandada no solo pela cultura da soja para a produtividade potencial de 3.900 kg ha⁻¹ pelo respectivo IS e dividir por 100 para se obter a quantidade suprida pelo solo. Assim, o suprimento de P, K e S pelo solo desse exemplo seriam aqueles constantes no quadro 35:

Quadro 35. Quantidades supridas pelo solo

P	K	S
..... kg ha ⁻¹	 kg ha ⁻¹	 kg ha ⁻¹
304,81 x 23,02 / 100 = 70,17	324,17 x 46,99 / 100 = 152,33	61,73 x 49,50 / 100 = 30,56

5.8. Quantidades a aplicar de P, K e S

Como não estão sendo considerados, nesse exemplo, os nutrientes provenientes de restos de cultura anterior e adubos orgânicos, o cálculo indicado pela equação 46, se resume à diferença entre a quantidade demandada no solo pela cultura (Quadro 30) e a quantidade suprida pelo solo (Quadro 35). Os resultados encontram-se no quadro 36.

Quadro 36. Cálculo da quantidade a aplicar de P, K e S (kg ha⁻¹)

	P	K	S
Cálculo	229,47 - 70,17 = 159,30	247,01 - 152,33 = 94,68	46,96 - 30,56 = 16,40
	P₂O₅	K₂O	
Correção (P₂O₅ e K₂O)³⁰	364,5	114,1	-
Ajuste/Sulco³¹	141,8	-	-

Partindo de uma análise de solo semelhante, o sistema proposto por Santos (2002), para a cultura da soja (FERTICALC-Soja), chegou a uma quantidade a aplicar de P₂O₅ de 103 kg ha⁻¹. Uma parte dessa diferença se deve, em primeiro lugar, às diferenças de abordagem entre os dois trabalhos, mas parte também pode ser creditada às diferenças entre alguns parâmetros de cálculo fundamentais. Por exemplo, Santos (2002) adotou uma taxa de recuperação do P do solo pela planta de 18,5%, enquanto nos cálculos do presente trabalho foi adotado o valor de 15,2%, e um teor de P nos tecidos da parte vegetativa de 1,43 g kg⁻¹, enquanto o teor aqui adotado foi de 2,86 g kg⁻¹. Além disso, esse autor calculou uma quantidade de 40 kg ha⁻¹ de P₂O₅ proveniente de restos de cultura anterior (milho), uma contribuição que não foi considerada neste exemplo. Sem essa contribuição, a dose recomendada pelo sistema de Santos (2002) seria de 143 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Como o resultado do sistema aqui proposto foi de 141,8 kg ha⁻¹ de P₂O₅, verifica-se que ambos chegaram a recomendações semelhantes apesar das diferenças de abordagem.

Diferenças ocorrem também na recomendação dos dois sistemas (o atual e o FERTICALC-Soja) para K e as mesmas considerações, feitas para a adubação fosfatada, referentes à diferença de abordagem e parâmetros de cálculo são cabíveis. No sistema de Santos (2002), a contribuição do suprimento pelo solo foi calculada em 50 kg ha⁻¹ de K₂O, diferindo do cálculo aqui exemplificado, que foi de 183 kg ha⁻¹ de K₂O (esse valor foi obtido pela transformação do resultado do quadro 35 de K para K₂O). No exemplo de Santos (2002), calculou-se a contribuição de restos de cultura anterior em 116 kg ha⁻¹ de K₂O, chegando a uma dose a aplicar de cerca de 76 kg ha⁻¹ de K₂O. Sem considerar essa contribuição, o resultado do cálculo do sistema aqui proposto foi de se aplicar 114,1 kg ha⁻¹ de K₂O.

³⁰ Os resultados de P e K foram transformados para a forma de óxidos, tanto nesse quadro quanto na discussão que se segue, incluindo os resultados de Santos (2002), para facilitar a sua comparação com as recomendações das tabelas.

³¹ O fator de correção (Fc), de 2,57, foi estimado de acordo com a equação $Fc = 4,2 - 0,04 \times P_{rem-60}$ (Santos, 2002)

Considerando-se que na cultura da soja há uma exportação de 20 kg ha^{-1} de K_2O para cada tonelada de grãos, prevê-se uma exportação de 60 kg ha^{-1} de K_2O . A recomendação obtida no sistema de Santos (2002) cobriria essa exportação, mas acrescentaria pouco K ao solo, e, portanto, esse continuaria praticamente com o mesmo teor baixo de 16 mg dm^{-3} de K. Com a recomendação do sistema aqui proposto seria coberta a exportação e sobraria uma quantidade substancial para enriquecer o solo com K. Os cálculos do sistema presente não foram configurados com o objetivo de enriquecimento do solo, mas ao considerar o balanço de massa do nutriente, em que a 'produtividade almejada' define a demanda da cultura³², ele automaticamente atende a uma eventual necessidade nesse aspecto, o que ocorre quando o solo é muito pobre no nutriente, como é o caso do exemplo utilizado.

³² Ver figura 14 e discussão correspondente.

6. Resumo das etapas dos cálculos para aplicação do sistema

No quadro 37 estão resumidas as etapas de cálculos, com algumas observações referentes a cada uma delas. As etapas são as mesmas para todos os grupos de culturas, com uma particularidade apenas para o grupo 'Arbóreas/Formação', para o qual não há o cálculo da matéria seca de CE nem DC, já que o próprio acúmulo anual de matéria seca é a produtividade, para efeitos de cálculo da demanda de nutrientes. Essa uniformização nos cálculos para culturas muito diferentes entre si é consequência da lógica simples com que o sistema foi idealizado, que pode ser resumida em 5 pontos básicos, como se segue:

1) A demanda, qualquer que seja a cultura, é proporcional à produtividade de matéria seca e à concentração de nutrientes nos diversos componentes da planta. O que diferencia as culturas são os componentes considerados;

2) Tem que existir, no solo, uma quantidade disponível do nutriente que seja capaz de atender à demanda da cultura, considerando-se que as raízes possuem uma eficiência menor que 100 % para absorver esse nutriente disponível. Portanto, a demanda, corrigida pela taxa de recuperação do nutriente do solo pela cultura, permite estimar a quantidade a ser disponibilizada no solo;

3) A demanda de nutrientes para a 'produtividade potencial' corresponde ao 'suprimento potencial' do nutriente pelo solo. Se há um resultado de análise de solo que caracteriza esse 'suprimento potencial', então os resultados inferiores correspondem a suprimentos proporcionalmente menores. Assim, é possível estimar o 'suprimento atual' pelo resultado da análise de solo³³;

4) A diferença entre o 'suprimento atual' e a quantidade que a cultura demanda para uma 'produtividade almejada' será coberta pela adição de nutrientes na forma de fertilizantes e, eventualmente, pelos nutrientes liberados pela decomposição de adubos orgânicos e, ou, restos de culturas anteriores;

³³ Para o N, como não há consenso sobre o método analítico e índices de disponibilidade para esse nutriente, procura-se estimar, por um lado, o seu estoque no solo usando suas principais fontes, que são a matéria orgânica, restos culturais e adubos orgânicos. Por outro lado, estima-se a dinâmica da transformação do N para prever o quanto desse estoque pode se tornar disponível durante o ciclo da cultura.

5) O acompanhamento do balanço de massa dos nutrientes ao longo de várias safras permite o monitoramento da sustentabilidade da exploração agrícola, sob o ponto de vista da manutenção da fertilidade do solo;

6) Não é possível conhecer o valor exato, em uma dada condição ambiental, das variáveis envolvidas nos cálculos, mas é possível estabelecer um escopo da variabilidade dessas variáveis, para que o usuário decida que valor irá adotar, dentro de uma faixa de valores viáveis.

Como uma das principais motivações para a proposição de uma nova abordagem nas recomendações é a falta de especificidade das recomendações das tabelas, procurou-se evidenciar, em cada etapa, os pontos em que há oportunidade de se especificar localmente as recomendações. Verifica-se que existem oportunidades de especificação do modelo em todas as etapas dos cálculos, algumas delas com mais de uma oportunidade, evidenciando a grande flexibilidade do sistema.

Quadro 37. Descrição das etapas do cálculo, com observações referentes às oportunidades de especificação das recomendações.

Passo	Observações
1) Preenchimento da planilha descrita no item 4.1.4	- A 'Produtividade Potencial' é uma oportunidade de especificar localmente o modelo; - A informação dos teores dos nutrientes em cada componente é uma oportunidade de especificação local do modelo; - para culturas do grupo 'Arbóreas/Formação', deve ser informado o 'Acúmulo anual de matéria seca', em vez da 'Produtividade Potencial'
2) Especificação da 'Produtividade almejada' e aplicação da função $DC = f(CE)$ para estimativa da produção de matéria seca dos diversos componentes, conforme descrito no item 4.1.3	- Para o grupo 'Arbóreas/Formação' não existe a função $DC = f(CE)$, já que não há componente exportado. A informação do 'Acúmulo anual de matéria seca' será utilizada para determinar a matéria seca de cada componente; - A 'Produtividade almejada' é uma oportunidade de especificação do modelo; - A função que permite estimar a produção de matéria seca de DC a partir da produção comercial é uma oportunidade de especificação do modelo.
3) Correção dos teores de P e S dos componentes, caso necessário.	- A necessidade de correção é determinada pela informação da variabilidade dos níveis críticos foliares de P e S, constante na planilha de informações, o que cria uma oportunidade de especificar os cálculos; - A correção é modulada pelo P_{rem60} do solo (equação 32), sendo essa, portanto, mais uma oportunidade de especificação local do modelo.
4) Cálculo da quantidade de nutrientes imobilizadas pela cultura (descrito no item 4.1.6), pela aplicação das equações 35, 38 e 39	- Esse cálculo é aplicável a todas as culturas, diferenciando-as, entretanto, conforme os componentes designados para cada uma delas (Quadro 13).
5) Especificação da cultura anterior e a sua produtividade alcançada, pelo preenchimento da respectiva planilha (passo 1).	- A ocorrência desse passo depende de opção do usuário, designando se houve ou não uma cultura anterior. Caso positivo, repetem-se, para a cultura anterior, os passos 2, 3 e 4.
6) Cálculo da quantidade de nutrientes demandada no solo, de acordo com o item 4.1.7, com a aplicação da equação 40, com as taxas de recuperação dos nutrientes pela cultura assinaladas na planilha de informações (Passo 1)	- A informação da taxas de recuperação dos nutrientes do solo pela plantas constitui-se em uma oportunidade de especificação local do modelo;
7) Cálculo da quantidade de nutrientes oriunda da decomposição dos restos da cultura anterior, pela aplicação dos índices de decomposição (quadro 25)	- O índice de decomposição anual de cada componente (quadro 25) é modulado para os meses de ocupação da cultura atual, da mesma forma designada para a decomposição da matéria orgânica do solo (item 4.2.1). Como essa modulação é feita de acordo com o balanço hídrico do local, verifica-se, aqui também, uma oportunidade de especificação do cálculo.

Continua...

Continuação do quadro 37

Passo	Observações
8) Cálculo do suprimento de N pelo solo (equação 43) e pela eventual adição de adubos orgânicos (item 4.2.5)	- a aplicação da equação 43 exige a informação do balanço hídrico local e da taxa de mineralização anual da matéria orgânica (quadro 23), sendo essas duas oportunidades de especificar localmente o modelo
9) Cálculo do suprimento de P, K e S pelo solo e pela eventual adição de adubos orgânicos	- Esse passo exige a repetição dos passos 2, 3 e 4, mas com a utilização da 'Produtividade Potencial' em substituição à 'Produtividade Almejada', para o cálculo do suprimento potencial dos nutrientes pelo solo, ao qual será aplicado o IS de cada nutriente (equações 44 e 45); - A parametrização da equação 45 exige a definição de IS_0, do teor no solo correspondente à 'Produtividade Potencial' e 'fm' (item 4.2.2), sendo essas, portanto, outras oportunidades de especificação local do modelo.
10) Cálculo das quantidades a aplicar de nutrientes (equação 46)	- Corresponde ao cálculo do balanço entre demanda e suprimento; - A quantidade de P a aplicar deve corrigida para aplicação localizada, no sulco de plantio. Se for utilizada a abordagem sugerida por Santos (2002), que calcula o fator de correção como função do P_{rem60} do solo, essa se constituirá em uma oportunidade de especificação local do modelo.

7. Resumo e Conclusões

O sistema de cálculo delineado aqui é passível de ser informatizado, visando à construção de um aplicativo de computador com flexibilidade suficiente para ser usado para efetuar cálculos de recomendações de adubação para diversas culturas agrícolas, pois é capaz de considerar as particularidades de cada uma em termos de componentes estruturais a serem considerados no cálculo da demanda de nutrientes. Como também se considera, nos cálculos, a capacidade do solo em suprir os nutrientes para as culturas de acordo com o nível de produtividade, o aplicativo permite o acompanhamento do balanço de massa de nutrientes em longo prazo, atendendo, assim, à necessidade de monitoramento da sustentabilidade da exploração em termos de manutenção da fertilidade do solo.

Além disso, verifica-se que a parametrização das diversas equações propostas permite o estabelecimento de recomendações localmente específicas e, portanto, isentas do artificialismo de fronteiras políticas artificiais, como acontece com as tabelas hoje utilizadas. A especificidade das recomendações permite também o acoplamento desse sistema de cálculos a sistemas de agricultura de precisão.

Não obstante, ficou evidenciado que há necessidade de levantamento de informações para compor o sistema, que são indispensáveis para construção do aplicativo, pois servirão para suprir o usuário com dados que ele possa utilizar enquanto não obtém as informações locais específicas. São, por exemplo, as informações referentes à composição elementar dos diversos componentes assinalados para cada cultura e o particionamento da matéria seca entre esses componentes.

Esse esforço de prospecção pode (e deve) ser feito por meio de arranjos multi-institucionais, englobando as principais instituições de pesquisa agropecuária brasileira, o que o tornará de mais fácil execução e servirá de ponto de partida para um trabalho em conjunto de aprimoramento desse sistema básico, com vistas a um futuro em que se compartilhe, em todo o território nacional, um mesmo sistema de recomendações de adubação, o que seria muito benéfico para o avanço da agricultura nacional.

8. Referências bibliográficas

ALVAREZ, V. H. **Avaliação da fertilidade do solo**: superfícies de resposta-modelos aproximativos para expressar a relação fator-resposta. Viçosa: Imprensa Universitária, 1985. 75 p.

ALVAREZ, V. H. V. ; RIBEIRO, A. C. Calagem. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. V. (Ed.) **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª aproximação**. Viçosa: CFSEMG, 1999. p. 43-60.

ALVAREZ, V. H. V.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados de análises de solo. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H.V. (Ed.) **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª aproximação**. Viçosa: CFSEMG, 1999. p. 25-32.

ALVAREZ, V. H. V.; NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Bol. Inf.**, Viçosa: SBCS, v. 25, n. 1, 2000.

ALVES, V. M. C.; VASCONCELLOS, C. A.; FREIRE, F. M.; PITTA, G. V. E.; FRANÇA, G. E.; RODRIGUES FILHO, A.; ARAÚJO, J. M.; VIEIRA, J. R.; LOUREIRO, J. E. Milho. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H.V. (Ed.) **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª aproximação**. Viçosa: CFSEMG, 1999. p. 314-316.

BANZATTO, D. A.; KRONKA, S. N. **Experimentação agrícola**. Jaboticabal: FUNEP, 1989. 247 p.

BATAGLIA, O. C.; QUAGGIO, J. A. Aplicação de modelos na avaliação da fertilidade do solo e nutrição das plantas. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 24., REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 8., SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 6., REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 3., 2000, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: SBCS;UFSM, 2000. 1 CD-ROM.

BEAUFILS, E. R. Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS). **Soil Sci. Bulletin**, Pietermaritzburg, University of Natal, n.1, 1973. 132 p.

BINDER, D. L.; DOBERMANN, A.; SANDER, D. H.; CASSMAN, K. G. Biosolids as nitrogen source for irrigated maize and rainfed sorghum. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, n. 66, 2002. p. 531-543.

BLACK, C. A. **Soil fertility evaluation and control**. Boca Ratón: CRC Press, 1993. 746 p.

BRAY, R. H. A nutrient mobility concept of soil-plant relation-ships. **Soil Sci.**, Madison, n. 78, p. 9-22, 1954.

CAMARGO, F. A O.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M. J.; VIDOR, C. Nitrogênio orgânico do solo. In: SANTOS, G. A. S. ; CAMARGO, F. A . O. (Ed) **Fundamentos**

- da matéria orgânica do solo ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre: Genesis, 1999. p.117-137.
- CARVALHO, F. T. **Sistema de interpretação de análise de solo para recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura do milho.** 2000. 93 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2000.
- CEPAGRI. **Zoneamento agrícola-Brasil.**
Disponível em: <<http://orion.cpa.unicamp.br/zonbrasil.htm>>. Acesso em: 04 set. 2002.
- COLWELL, J. D. ; SUHET, A. R. ; RAIJ, B. van. **Statistical procedures for developing general soil fertility models for variable regions.** Melbourn, CSIRO, Division of Soils, 1988. (Report 93)
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO RS E SC. **Recomendações de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.** 3 ed. Passo Fundo: SBCS,Núcleo Regional Sul, 1994. 224 p.
- DAMPNEY, P. M. R.; FROMENT, M. A.; DAWSON, C. J. The variability of pH and available phosphorus, potassium and magnesium in soils within arable fields in England. **Precision Agriculture**, Norwell, MA, 1997, p. 79-85.
- FAO. **What is meant by food insecurity and vulnerability?** Disponível em: <<http://www.fao.org/spfs/index.asp?lang=em>>. Acesso em: 19 fev. 2003.
- FIVMS. **The special programme for food security.** Disponível em: <<http://www.fivims.org/index.jsp?lang=em>>. Acesso em: 19 fev. 2003.
- FONSECA, D. M. **Níveis críticos de fósforo em amostras de solos para o estabelecimento de *Andropogon gayanus*, *Brachiaria decumbens* e *Hyparrhenia rufa*.** 1987. 146 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG,1987.
- FRANÇA, G. E.; OLIVEIRA, A. C.; MANTOVANI, E. C.; ANDRADE, C. L. T; MARRIEL, I. E. Análise preliminar de mapas de variabilidade espacial da fertilidade de solo. In: BORÉM, A. *et al.* (Ed). **Agricultura de Precisão**, Viçosa: UFV, 2000. 467 p.
- FREIRE, F. J. **Sistema para cálculo do balanço nutricional e recomendação de corretivos e fertilizantes para cana-de-açúcar.** 144 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001.
- GOH, K. M. ; HAYNES, R. J. Nitrogen and agronomic practice. In: HAYNES, R. J. (Ed.) **Mineral nitrogen in the plant-soil system.** Orlando: Academic Press, 1986. p. 379-468.
- GRAY, R. Economic Measures of Sustainability Part 1. **Canadian Journal of Agricultural Economics**, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, v. 39, n. 4, p. 627-635,1991.

GREAT PLAINS. **Measurement of sustentability.** Disponível em: <<http://iisd.ca/agri/GPmeasure.htm#secondp>>. Acesso em: 19 fev. 2003.

HAEFELE, S. M.; WOPEREIS, M. C. S.; NDIAYE, M. K.; BARRO, S. E.; ISSELMOU, M. O. Internal nutrient efficiencies, fertilizer recovery rates and indigenous nutrient supply of irrigated lowland rice in Sahelian West Africa. **Field Crops Research**, Amsterdam, Netherland, v. 80, n.1, p.19-32, 2003.

HANSEN, S.; JENSEN, H. E. Developments in modeling nitrogen transformation in soil. In: BACON, P. E. (Ed.) **Nitrogen fertilization in the environment**. Nova York, Marcel Dekker, 1995. 608 p.

HILINSKI, T. **Century soil organic matter model:** version 5. Colorado, U. S. A.: Colorado State University/Natural Resource Ecology Lab., 2001. Disponível em: <<http://www.nrel.colostate.edu/projects/century5/reference/Century.chm>>. Acesso em: 10 jan.2003.

JANSSEN, B. H. A simple method for calculating decomposition and accumulation of 'young' soil organic mater. **Plant Soil**, New England, n. 76, p. 297-304, 1984.

JANSSEN, B. H.; GUIKING, F. C. T. ; EIJK, D. van der ; SMALING, E. M. A.; WOLF, J.; REULER, H. van. A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS). **Geoderma**, Amsterdam, Netherlands, n. 46, p. 299-318, 1990.

JOHNSON, G. V. General model for predicting crop response to fertilizer. **Agron. J.**, Madison, WI, n. 83, p. 367-373, 1991.

JONES, C. A. Proposed modifications of the Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS) for interpreting plant analyses. **Commun. Soil Sci. Pl. Anal.**, Baltimore, n. 12, p. 785-794, 1981.

KEULEN, H. van. Crop yield and nutrient requirements. In: KEULEN, H. van ; WOLF, J. (Eds). **Modelling agricultural production: weather, soils and crops**. Wageningen, Pudoc, 1986. p.155-181.

KHIEL, J. E. **Fertilizantes orgânicos**. Piracicaba: Ag. Ceres, 1989. 492 p.

KLEPKER, D.; BORKERT, C. M.; SFREDO, G. J. Adubação e nutrição da soja em solos tropicais de baixa latitude, em sistema de semeadura direta e convencional. In: HOFFMANN-CAMPO, C. B. ; SARAIVA, O. F. (Org.) **Resultados de pesquisa da Embrapa Soja**, 2001: solos. Londrina, Embrapa Soja, 2002. p. 15-32.

LEAL, M. A. A.; DE-POLLI, H. Aplicação de modelos ao estudo da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A. S.; CAMARGO, F. A, O. (Ed.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo-ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Genesis, 1999. p. 245-258.

MATTHEWS, R. Crop and farming systems. In: MATTHEWS, R.; STEPHENS, W. (Ed.) **Crop-soil simulation models**. London, CAB International. p. 29-53, 2002.

MELLO, M. S. **Sistema de interpretação de análise de solo e de recomendação de calagem e fertilizante para a cultura de tomate**. 2000. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2000.

MULLER, D.; MURTEIRA, B. F.; TURKMAN, F. **Análise de Sucessões Cronológicas**. Lisboa, McGraw-Hill, 1993.

MUNIZ, A. S. **Disponibilidade de fósforo avaliada por extratores químicos e pelo crescimento de soja (Glycine Max (L.) Merrill) em amostras de solos com diferentes valores do fator capacidade**. 1983. 79 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa. 1983.

MUNIZ, A. S.; NOVAIS, R. F.; FREIRE, F. M.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F. Disponibilidade de fósforo e recomendação de adubação fosfatada avaliadas por meio de extratores químicos e do crescimento de soja em amostras de solo com diferentes valores do fator capacidade. **R. Ceres**, Viçosa, n.34, p.125-151, 1987.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG: UFV, 1999. 399 p.

NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H. Sistemas de interpretação de análise de solo e recomendação de fertilizantes: muito simples ou muito complexo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 24, REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 8., SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 6., REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 3., 2000, Santa Maria. **Anais....** Santa Maria, SBSCS;UFSM, 2000. 1 CD-ROM.

NUTMON. **Nutrient monitoring for tropical farming systems**. Disponível em: <<http://www.nutmon.org/about.htm>>. Acesso em: 05 jun 2002.

OLIVEIRA, F. H. T. **Sistema para recomendação de calagem e adubação para a cultura da bananeira**. 2002. 88 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

OLIVEIRA, S. A. Análise Foliar. In: SOUZA, D. M. G. ; LOBATO, E. (Ed.) **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina, Embrapa Cerrados, 2002. p. 245-256.

OSMOND, D. L.; SMYTH, T. J.; YOST, R. S.; HOAG, D. L.; REID, W. S.; BRANCH, W.; WANG, X.; LI, H. Nutrient Management Support System (NuMaSS). **Soil Management Collaborative Research Support Program, Technical Bulletin**, North Carolina State University, Raleigh, v. 2, n. 2, 2002. 32 p.

PASSIOURA, J. B. Simulation models: science, snake oil, education, or engineering? **Agron. J.**, Madison, n. 88, p. 690-694, 1996.

PARENTONI, S. N.; FRANÇA, G.E.; BAHIA FILHO. A. F. C. Avaliação dos conceitos de quantidade e intensidade de mineralização de nitrogênio para trinta solos do Rio Grande do Sul. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, n.12, p. 225-229, 1988.

PARTON, W. J.; STEWART, J. W. B. ; COLE, C.V. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model. **Biogeochemistry**, Dordrecht, Netherlands, n. 5, p. 109-131, 1988.

PREZOTTI, C. L.; NOVAIS, R. F. de; ALVAREZ, V. H.; CANTARUTTI, R. B.; BARROS, N. F. Adubação de formação e manutenção de cafezais (sistema para recomendação de fertilizantes e corretivos de solo para a cultura do café arábica). In: ZAMBOLIN, L. (Ed.) ENCONTRO SOBRE CAFÉ: PRODUTIVIDADE, QUALIDADE E SUSTENTABILIDADE. Viçosa, UFV, 2000. 396 p.

PREZOTTI, L. C. **Sistema para recomendação de corretivos e de fertilizantes para a cultura do café arábica**. 2001. 93 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

QUAGGIO, J. A. Resposta das culturas à calagem. In: MALAVOLTA, E. (Coord.) SEMINÁRIO SOBRE CORRETIVOS AGRÍCOLAS. Campinas: Fundação Cargill, 1985. p. 123-157.

QUEMADA, M.; CABRERA, M. L.; McCracken, D. V. Nitrogen release from surface-applied cover crop residues: evaluating the CERES-N submodel. **Agron. J.**, Madison, n.89, p. 723-29, 1997.

RAFFAELI, V. **Sistema de interpretação de análise de solo e de recomendação de nutrientes para arroz irrigado**. 2000. 76p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa. 2000.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H. A quadratic model for fertilizer recommendations based on results of soil analyses. **Comm. Soil Sci.Plant Anal**, New York, v. 27, n. 5-8, p. 1595-1610, 1996.

RAIJ, B. van. **Avaliação da fertilidade do solo**. Piracicaba: Instituto Internacional da Potassa, 1983. 142 p.

RAIJ, B. Van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.) **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2 ed. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas: FUNDAÇÃO IAC, 1996. 285p. (Boletim Técnico 100).

REGMI, A. P.; LADHA, J. K.; PATHAK, H.; PASUQUIN, E.; BUENO, C.; DAWE, D.; HOBBS, P. R.; JOSHY, D.; MASKEY, S. L.; PANDEY, S. P. Yield and soil fertility trends in a 20-Year rice-rice-wheat experiment in Nepal. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, n. 66, p. 857-867, 2002.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H.V. (Ed.) **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª aproximação**. Viçosa: CFSEMG,1999. 359 p.

RICH, E. **Inteligência artificial**. São Paulo: McGraw-Hill, 1988. 503 p.

ROSA, G. N. G. P. **Sistema de recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura do coqueiro**. 2002. 76 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa. 2002.

RYKIEL, E. J. Testing ecological models: the meaning of validation. **Ecological Modelling**, Saint Louis, n. 90, p. 229-244, 1996.

SANTOS, F. C. **Sistema de recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura da soja**. 2002. 100 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa. 2002.

SCHILINDWEIN, J. A.; ANGHINONI, I. Variabilidade horizontal de atributos de fertilidade e amostragem do solo no sistema de plantio direto. **Rev. Bras. Ci Solo**, Viçosa, n. 24, p. 85-91, 2000.

SEMB, G.; UHLEN, G. A comparison of different analytical methods for the determination of potassium and phosphorus in soil based on field experiments. **Acta Agriculturae Scandinavica**, Stockholm, n. 5, p. 44-68, 1954.

SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S. Matéria orgânica do solo. In: VARGAS, M. A. T.; HUNGRIA, M., (Ed). **Biologia dos solos dos cerrados**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 1997. p. 467-524.

SMYTH, J. U.; BRADBURY, N. J.; ADDISCOTT, T. M.; SUNDIAL, A. PC-based system for simulating nitrogen dynamics in arable land. **Agron. J.**, Madison, n. 88, p. 38-43, 1996.

STANFORD, G. S.; SMITH, S. J. Nitrogen mineralization potentials of soils. **Soil Sci. Soc. Amer. Proc.**, Madson, n. 36, p. 465-472, 1972.

TOMÉ JÚNIOR, J. B.; NOVAIS, R. F. Utilização de modelos como alternativas às tabelas de recomendação de adubação. **Bol. Inf. Soc. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, n. 25, p. 8-11, 2000.

VASCONCELOS, C. A.; MARRIEL, I. E. SANTOS, F.G.; MAGALHÃES, C. A. O. Influência do manejo de solo e do resíduo de sorgo na mineralização do nitrogênio e na relação $N-NH_4^+$ e $N-NO_3^-$. In: ENCONTRO BRASILEIRO SOBRE SUBSTÂNCIAS HÚMICAS, 3., 1999, Santa Maria. **Matéria orgânica e qualidade ambiental**: resumos. Santa Maria: IHSS, p. 189-199, 1999.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: Imprensa Universitária, 1991. 448p.

WADE, L. J.; GEORGE, T.; LADHA, J. K.; SINGH, U.; BHUIYAN, S. I.; PANDEY, S. Opportunities to manipulate nutrient-by-water interactions in rainfed lowland rice systems. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 56, n. 1-2, p. 93-112, 1998.

WALWORTH, J. L.; SUMNER, M. E. The diagnosis and recommendation integrated system (DRIS). **Advances in Soil Science**, New York, NY, n. 6, p. 149-188, 1987.

WANG, G.; DOBERMANN, A.; WITT, C.; SUN, Q.; FU, R. Performance of site-specific nutrient management for irrigated rice in Southeast China. **Agron. J.**, Madison, WI, n. 93, p. 869-878, 2001.

WOLF, J.; WIT, C. T.; KEULEN, H. van. Modeling long-term crop response to fertilizer and soil nitrogen. I-Model description and application. **Plant Soil**, London, n. 120, p. 11-22, 1989.

ZENTNER, R. **Economics of soil conservation in Western Canadá**, Research Branch, Agriculture Canadá Research Station, Swift Current, 1981.