

LUIZ CARLOS PREZOTTI

SISTEMA PARA RECOMENDAÇÃO DE CORRETIVOS
E DE FERTILIZANTES PARA A CULTURA
DO CAFÉ ARÁBICA

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
2001

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

P944s
2001

Prezotti, Luiz Carlos, 1978-

Sistema para recomendação de corretivos e de fertilizantes para a cultura do café arábica / Luiz Carlos Prezotti. - Viçosa : UFV, 2001.
93f. : il. ; 29cm.

Orientador: Roberto Ferreira de Novais.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

1. Café - Nutrição - Modelos matemáticos. 2. Café - Adubos e fertilizantes - Programas de computador. 3. Software de aplicação. 4. Sistema para Recomendação de Corretivos e Fertilizantes (Programa de computador). I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 19.ed. 581.1335

CDD 20.ed. 581.1335

LUIZ CARLOS PREZOTTI

SISTEMA PARA RECOMENDAÇÃO DE CORRETIVOS
E DE FERTILIZANTES PARA A CULTURA
DO CAFÉ ARÁBICA

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: 9 de março de 2001.

Prof. Victor Hugo Alvarez V.
(Conselheiro)

Prof. Reinaldo Bertola Cantarutti

Prof. Roberto de Aquino Leite

Dr. Paulo T. Gontijo Guimarães

Prof. Roberto Ferreira de Novais
(Orientador)

À minha esposa *Elizabeth*
e aos meus filhos *Laís* e *Vinícius*.

AGRADECIMENTO

Ao Instituto Capixaba de Pesquisa Assistência Técnica e Extensão Rural, pela liberação concedida para realização deste curso.

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Solos, pela oportunidade de realização deste curso.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor e orientador Roberto Ferreira de Novais, pelos ensinamentos transmitidos.

Aos professores Victor Hugo Alvarez V., Reinaldo Bertola Cantarutti e Nairam Félix de Barros, pela co-orientação.

Aos amigos José Francisco Teixeira do Amaral, Maria Amélia Gava Ferrão, Aymbiré Francisco Almeida da Fonseca, Sérgio Luiz Caixeta e Tiago Pinto Trindade, pelas sugestões e pela agradável convivência.

BIOGRAFIA

LUIZ CARLOS PREZOTTI, filho de Luiz Prezotti e Izabel Colombi Prezotti, nasceu em Guarapari, Estado do Espírito Santo, em 13 de outubro de 1958.

Em dezembro de 1982, graduou-se em Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal do Espírito Santo, em Alegre (ES).

No período de 1983 a 1984, realizou o curso de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas, na Universidade Federal de Viçosa (MG).

Em maio de 1985, foi contratado pela Empresa Capixaba de Pesquisa Agropecuária (EMCAPA), hoje Instituto Capixaba de Pesquisa Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER), onde permanece com o cargo de pesquisador.

Em março de 1997, iniciou o curso de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas na Universidade Federal de Viçosa (MG), submetendo-se à defesa de tese em 9 de março de 2001.

ÍNDICE

	PÁGINA
RESUMO	viii
ABSTACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Modelagem	4
2.3. Características nutricionais do cafeeiro	7
3. O SISTEMA	11
3.1. Fertilização do substrato para a produção de mudas	12
3.2. Adubação de cova de plantio	13
3.3. Recomendação de adubação de formação e de produção	14
3.3.1. Estimativa da produção de biomassa vegetativa	14
3.3.2. Estimativa da biomassa de frutos	17
3.4. Estimativa da demanda de nutrientes	18
3.5. Eficiência de recuperação de nutrientes pela planta	21
3.6. Determinação da disponibilidade de nutrientes do solo	22
3.6.1. Recuperação de fósforo pelo Mehlich-1	23
3.6.2. Teor de fósforo pela resina de troca aniônica em função da dose de fósforo adicionada	24
3.6.3. Estimativa do PR ₆₀ em função do teor de argila	25
3.6.4. Teor de potássio pelo Mehlich-1 em função da dose de potássio adicionada	26

3.6.5. Cálcio trocável em função da dose de cálcio adicionada.	27
3.6.6. Magnésio trocável em função da dose de magnésio adicionada	28
3.6.7. Taxa de recuperação do enxofre aplicado pelo Ca (H ₂ PO ₄) em HOAc em função do PR ₆₀	29
3.6.8. Taxa de recuperação do enxofre pela resina de troca aniônica em função da dose de enxofre aplicada	30
3.6.9. Taxa de recuperação de boro pela água quente em função da dose de boro aplicada	30
3.6.10. Taxa de recuperação de cobre em função da dose de cobre adicionadas	31
3.6.11. Taxa de recuperação com Mehlich-1 do zinco aplicado em função do PR ₆₀	32
3.6.12. Estimativa da quantidade de nitrogênio no solo	33
3.7. Suprimento de nutrientes pelo solo	34
3.8. Quantidade de nutriente a ser aplicada (recomendação)	35
3.9. Teor mínimo de nutriente no solo para sustentabilidade da produção	35
3.10. Fertilização de lavouras recepadas	36
3.11. Estimativa da quantidade de nutrientes disponibilizada pela biomassa vegetativa de lavouras podadas	36
3.11.1. Recepa	36
3.11.2. Esqueletamento	37
3.11.3. Decote	38
3.12. Calagem	38
3.13. Gessagem	40
3.14. Análise de sensibilidade	40
3.15. Informações geradas pelo Sistema	40
4. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA	42
4.1. Fertilização do substrato para a produção de mudas	43
4.1.1. Fósforo	43
4.1.2. Potássio	43
4.1.3. Cálcio e magnésio	44
4.1.4. Enxofre	44
4.1.5. Boro	45
4.1.6. Zinco	45
4.1.7. Nitrogênio	45
4.2. Recomendação de fertilização de cova de plantio	46
4.3. Recomendação de fertilização de primeiro ano	47

4.3.1. Estimativa da produção de biomassa	47
4.3.2. Estimativa do conteúdo de nutrientes	48
4.3.3. Eficiência de recuperação de nutrientes pela planta	49
4.3.4. Quantidade de nutrientes requerida pela cultura	49
4.3.5. Estimativa do suprimento de nutrientes do solo	49
4.3.6. Quantidade de nutrientes recomendada	50
4.4. Recomendação para fertilização de segundo ano	51
4.4.1. Estimativa da produção de biomassa vegetativa	51
4.4.2. Produção de biomassa de frutos	52
4.4.3. Estimativa do conteúdo de nutrientes na planta	52
4.4.4. Recuperação de nutrientes pela planta	53
4.4.5. Quantidade de nutriente requerida pela cultura	54
4.4.6. Estimativa do suprimento de nutrientes do solo	55
4.4.7. Quantidade de nutrientes a ser recomendada pelo Sistema .	56
4.5. Recomendação de fertilizantes para lavoura com idade superior a dois anos	57
4.6. Estimativa da quantidade de calcário	58
4.6.1. Estimativa da quantidade de calcário com base na demanda de Ca e Mg pelo cafeeiro	58
4.6.2. Estimativa da quantidade de calcário com base na elevação da saturação de bases	59
4.6.3. Estimativa da quantidade de calcário com base na neutralização do Al e elevação dos teores de Ca e Mg ...	59
4.7. Suprimento de nutrientes oriundos da poda	60
4.7.1. Recepa	60
4.7.2. Esqueletamento	61
4.7.3. Decote	61
4.8. Suprimento de nutrientes oriundos da casca dos frutos de café	64
4.9. Teor mínimo de nutriente no solo para sustentabilidade da produção	64
4.10. Análise de sensibilidade	65
4.11. Equações múltiplas de estimativa da dose de nutrientes	69
4.12. Comparação entre recomendações	80
5. RESUMO E CONCLUSÕES	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85

RESUMO

PREZOTTI, Luiz Carlos, D.S., Universidade Federal de Viçosa, março de 2001. **Sistema para recomendação de corretivos e de fertilizantes para a cultura do café arábica**. Orientador: Roberto Ferreira de Novais. Conselheiros: Victor Hugo Alvarez V. e Nairam Félix de Barros.

Com base em informações disponíveis sobre a nutrição do cafeeiro e sobre os fatores que influenciam a disponibilidade de nutrientes do solo, desenvolveu-se um Sistema para recomendação de corretivos e de fertilizantes para a cultura do café arábica. Este Sistema tem por princípio o balanço nutricional, isto é, estima a adubação com base na diferença entre a quantidade de nutrientes necessária para a produção de biomassa vegetativa e de frutos e a quantidade de nutriente disponível no solo, utilizando equações que consideram idade da cultura, produtividade, população de plantas, volume de solo explorado pelas raízes, teor de nutrientes do solo e seu fator capacidade. Considera também a adição de nutrientes via retorno da casca de frutos, da biomassa incorporada por meio de podas (recepa, decote, esqueletamento e desbaste) e da adubação orgânica. Com o objetivo de comparar as recomendações de adubação adotadas nos estados maiores produtores de café do País com as estimadas

pelo Sistema, foram realizadas várias simulações, em que se observam variações das doses de nutrientes, provavelmente atribuídas às diferentes características regionais de solo e clima. As doses determinadas pelo Sistema para essa comparação foram estimadas utilizando-se valores médios das variáveis (fator capacidade dos solos, teor do elemento “disponível”, produtividade e população de plantas). Em situações em que uma ou mais dessas variáveis se distancia da média, o Sistema apresenta maior sensibilidade, variando as recomendações de maneira contínua, aproximando-se mais da realidade, ao passo que as tabelas não apresentam essa flexibilidade.

ABSTRACT

PREZOTTI, Luiz Carlos, D.S., Universidade Federal de Viçosa, March 2001. **Liming and fertilizer recommendation for arabic coffee.** Adviser: Roberto Ferreira de Novais. Committee members: Victor Hugo Alvarez V. and Nairam Félix de Barros.

A system for liming and fertilizer recommendation for the arabic coffee culture was developed based on the available information about coffee plant nutrition and the factors that influence nutrient availability in soils. The principle of this system is the nutritional balance. The fertilization is based on the difference between the amount of nutrients needed for vegetative and fruit growth and the amount of nutrient available in the soil, and estimated through a series of equations that consider the age of the culture, productivity, plant population, soil volume explored by roots, soil nutrient status and the soil's capacity factor. The system also takes in account the addition of nutrients by incorporation of fruit and plant parts to the soil after pruning and also by organic fertilization. Several simulations were carried out with the objective of comparing the fertilizer doses used in the states which show highest coffee productions in Brazil and the doses estimated by the proposed

system. A variation in the nutrient doses was observed, probably due to differences in the regional climate and soils. The doses determined by the system used for these comparisons were estimated by using mean values for the different variables (soil capacity factor, nutrient “availability” , productivity and plant population). In cases where one or more of these variables distance form the mean value, the system presents higher sensibility with a continue recommendation variation, closer to reality, whereas the tables don’t have this flexibility.

1. INTRODUÇÃO

Dentre os fatores que mais têm contribuído para a baixa produtividade do cafeeiro destaca-se os relacionados à nutrição e adubação. A alta exigência nutricional aliada ao desconhecimento da real demanda de nutrientes pela cultura contribuem para o agravamento do problema.

A recomendação de adubação para a cultura do cafeeiro e para a maioria das culturas é baseada em tabelas elaboradas a partir da experiência de técnicos e produtores e em trabalhos de calibração, realizados em locais específicos, sendo os resultados extrapolados para diferentes condições. Embora esse Sistema tenha contribuído para a uniformização das recomendações de adubação, atualmente, as pesquisas estão concentradas no desenvolvimento de Sistemas que consideram simultaneamente variáveis que influenciam a disponibilidade de nutrientes e sua absorção pelas plantas. Isto tem sido facilitado pelo desenvolvimento de modelos mecânicos para estimar a disponibilidade de nutrientes no solo e a demanda de nutrientes em função da espécie e da produtividade. Além do mais, esses Sistemas são passíveis de

mudanças, permitindo a atualização dos modelos à medida que novos conhecimentos são acumulados.

O advento do NUTRICALC, desenvolvido pelo Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa para a cultura do eucalipto foi um marco para a geração de novos Sistemas, permitindo a abservância dos pontos de maior carência da pesquisa, e com isto, direcionando os novos trabalhos.

Em razão da importância econômica da cultura do café para o Brasil, iniciou-se o desenvolvimento de um Sistema para recomendação de corretivos e de fertilizantes para a esta cultura, o qual reúne grande volume de informações de pesquisa na área de solos e nutrição e tem como base, para cálculo do balanço nutricional da lavoura, a demanda de nutrientes necessários para a obtenção da produtividade desejada.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A maioria dos trabalhos em fertilidade de solos refere-se à experimentação, em que se submetem plantas a quantidades crescentes de nutrientes para obtenção das doses que proporcionam a produção máxima econômica. Essas doses são correlacionadas com teores de nutrientes do solo obtidos por extratores, objetivando-se determinar as faixas de disponibilidade desses elementos. Os resultados obtidos são extrapolados para diferentes condições.

Para aumentar a exatidão desse método, trabalhos dessa natureza devem ser realizados em grande número de locais, envolvendo diversas combinações de solo, ambiente, cultura e tratos culturais. Como resultado, são obtidas diferentes recomendações para as diversas situações, sendo necessário o agrupamento de informações, visando facilitar sua utilização (TOMÉ JUNIOR e NOVAIS, 2000). As médias obtidas podem englobar resultados muito distintos, ficando embutidos erros que tornam a extrapolação das recomendações pouco exatas.

Atualmente, com o grande número de informações geradas pela pesquisa sobre a nutrição de plantas e sobre a disponibilidade de nutrientes do solo e com as facilidades proporcionadas pela informática, é

possível a utilização de modelos matemáticos que estimem, com mais exatidão, a demanda de nutrientes pela cultura e a capacidade de suprimento de nutrientes pelo solo.

Nos últimos anos, diversos modelos para culturas têm sido desenvolvidos e, em alguns casos, observa-se que o simples ordenamento das informações disponíveis gera estimativas mais próximas da realidade e auxilia na indicação das áreas de maior carência de informações, possibilitando o direcionamento das futuras pesquisas.

2.1. Modelagem

Os modelos podem ser classificados em dois grupos básicos quanto ao aprofundamento e aos objetivos: modelos científicos ou mecânicos e modelos de engenharia (PASSIOURA, 1996). Os modelos pertencentes ao primeiro grupo procuram ser úteis à formação e evolução acadêmica dos envolvidos em seu desenvolvimento e, freqüentemente, apresentam poucas soluções práticas; por outro lado, aqueles do segundo grupo procuram soluções práticas e funcionais.

Segundo MONTEITH (1996), os modelos científicos identificam falhas ou lacunas de informações mais exatas e, portanto, estimulam novos trabalhos científicos. Eles procuram entender como as coisas funcionam, enquanto os modelos tidos como empíricos procuram resolver problemas práticos. A resolução dos modelos mecânicos passa, normalmente, por cálculos numéricos complexos, dependentes de computadores. Suas validações são feitas pela comparação dos resultados estimados com os observados em condições controladas de crescimento de plantas ou mesmo em condição de campo.

Na classificação de BOTTERWEG (1995), os modelos são “complexos” quando os processos são matematicamente descritos, incluindo todos os detalhes conhecidos, e são considerados “simples”

quando um processo é descrito por uma equação empírica. Esses termos são usados para caracterizar um modelo e não se referem à qualidade.

REYNOLDS e ACOCK (1985) classificaram as fontes de erro, em relação à complexidade dos modelos, em erros de estimativa das variáveis e erros sistemáticos, resultantes do excesso de simplificação. Eles postulam que os erros cumulativos das estimativas crescem com o número de variáveis e os erros sistemáticos decrescem com o aumento da complexidade.

Nos últimos 20 anos, dezenas de modelos de simulação agrícola e ecológica têm sido desenvolvidos. Segundo REYNOLDS e ACOCK (1997), esses modelos, com raras exceções, apresentam uma única estrutura; sua documentação consiste de uma resumida descrição publicada em uma revista científica; sua estrutura não é disponível para uso por outro pesquisador; e são atualizados somente por seus idealizadores. Como resultado, esses modelos têm aplicação limitada; raramente sobrevivem sem seus idealizadores e representam duplicação de esforços.

Atualmente, a tendência é de elaboração de modelos altamente complexos, com grande número de variáveis, que simulam diversos fenômenos. Muitos desses modelos são tão complexos que pesquisadores e usuários sentem dificuldade de entendimento e de realizarem análises críticas, sentindo-se desestimulados em alterar sua estrutura. Isso tem dificultado avanços ou melhorias desses modelos ou utilização de parte deles em outros novos modelos (ACOCK e REYNOLDS, 1997).

Três considerações governam a estrutura de um modelo genérico: deve representar os conceitos científicos existentes de processos e suas interações; o Sistema deve ser constituído por módulos que interagem e que podem ser testados independentemente e permitir o controle intelectual de seu desenvolvimento; e deve estar sujeito à modificação pelo usuário, de modo que facilite as futuras adaptações (TIMLIN e PACHEPSKY, 1997).

Atualmente, os modelos mecanísticos estão sendo usados como ferramenta de ensino. Entretanto, PHILIP (1991) já alertava para o perigo de que estudantes se tornem tão direcionados e, por ainda não terem conhecimento suficiente para questionamentos mais aprofundados sobre a constituição dos modelos, considerem as estimativas dos modelos como totalmente verdadeiras.

Os modelos devem considerar um número razoável de variáveis de fácil obtenção a serem utilizadas. Modelos de simulação da absorção de nutrientes, como o desenvolvido por SMETHURST e COMERFORD (1993), utilizado com frequência na área florestal, necessitam de informações sobre 30 variáveis. A praticidade desses modelos esbarra no grande volume de informações requerido e não-disponível em condições práticas (NOVAIS e SMYTH, 1999).

As modelagens para culturas são particularmente utilizadas como síntese dos resultados de pesquisa, dando um sentido reducionista aos processos. Os modelos integram os vários processos da fisiologia das plantas, podendo-se avaliar a influência de cada variável no resultado final. Segundo SINCLAIR e SELIGMAN (1996), a literatura contém muitos trabalhos que descrevem a construção e o teste de modelos, mas um número pequeno destes tem sido utilizado.

A disponibilidade de modelos para culturas pode proporcionar ao pesquisador orientação quanto a novas pesquisas de maneira objetiva, observando as lacunas do processo. Determinadas lacunas podem ser completadas por pesquisadores de outras áreas, dando o sentido interdisciplinar ao modelo.

Com relação à cultura do cafeeiro, SNOECK e JADIN (1990) desenvolveram um Sistema para a recomendação de adubação que tem por princípio a elevação dos teores de nutrientes a valores do nível crítico, na massa de solo referente à área de aplicação dos fertilizantes. Entretanto, é um método polêmico, pois gera dúvidas quanto à sua fundamentação, devido aos seguintes pontos: a quantidade de nutrientes recomendada para

o cafeeiro torna-se variável em função da largura e do comprimento da faixa de aplicação dos fertilizantes; e o método considera um valor fixo de nível crítico de P (45 mg dm^{-3} - Olsen), com o qual são realizados os cálculos de adubação. Embora os autores não comentem sobre esse assunto, convém ressaltar que os métodos baseados no nível crítico de nutrientes têm que considerar sua variação com a idade da planta e com os níveis de produtividade da cultura. O cafeeiro é mais exigente em P no início do seu desenvolvimento, reduzindo essa exigência com a idade, provavelmente em razão do aumento do volume de solo explorado pelas raízes. Lavoura com produtividade elevada exigirá maior quantidade de nutrientes, quando comparada a uma lavoura pouco produtiva. Portanto, a generalização de um nível crítico para uma determinada cultura, independentemente dos fatores anteriormente citados, pode gerar grandes equívocos na recomendação de fertilizantes; este método não considera características do solo que refletem sua capacidade de tamponamento, sendo os valores de níveis críticos, principalmente para fósforo, independentes do teor e da qualidade da argila.

Um modelo é tanto mais consistente quanto mais confiáveis forem as informações utilizadas para seu ajuste. Assim, é importante o estudo aprofundado das características nutricionais e fisiológicas da cultura, para que se tornem claros os pontos de maior carência de informações e que deverão ser mais explorados por futuras pesquisas.

2.2. Características nutricionais do cafeeiro

Alterações das concentrações de macronutrientes nos frutos e nas folhas do cafeeiro Catuaí Amarelo, bem como a acumulação de nutrientes nos frutos, foram estudadas por CHAVES e SARRUGE (1984). Foi observada grande redução nas concentrações foliares de N, P e K na fase de crescimento dos frutos, atingindo teores abaixo dos considerados adequados. Os teores de Ca e Mg apresentaram-se muito baixos logo após

o florescimento, mas aumentaram à medida que os frutos progrediram para a maturação. Quanto ao acúmulo de macronutrientes nos frutos, aproximadamente 80% da quantidade total de N, P, K, Ca e Mg foi acumulada durante 120 a 150 dias, a partir do início da frutificação.

CORRÊA et al. (1986) observaram que, em lavouras de café Catuaí, a maior demanda de nutrientes, em anos de alta produtividade, ocorre em função da frutificação, enquanto nos anos de baixa produtividade a demanda é maior pela parte vegetativa. Os autores concluem que não se deve reduzir a fertilização em anos de baixa produtividade.

Variando a adubação do cafeeiro entre anos de safra baixa e alta, VIANA (1993) concluiu que o melhor tratamento foi aquele em que as plantas receberam adubação todos os anos.

Segundo MAESTRI e BARROS (1977), o crescimento do fruto do cafeeiro segue uma curva sigmóide dupla: no início o crescimento é muito lento; segue-se um período de crescimento rápido, até que o fruto verde se aproxime do seu tamanho final; vem depois um período de lento ou nenhum aumento, que vai até o início da maturação; e finalmente, recomeça o crescimento no estágio de “cereja”, quando aumenta rapidamente de tamanho.

Plantas no estágio inicial de desenvolvimento possuem altas concentrações de nutrientes como N, P, K e S. A concentração de cada nutriente declina com a maturidade da planta. Geralmente, quando um elemento limitante da produção é adicionado e um subsequente crescimento ocorre, há elevação da concentração deste elemento nos tecidos. No entanto, as concentrações de outros elementos (não-limitantes do crescimento) nesses tecidos podem decrescer devido ao efeito de diluição, apesar do aumento do conteúdo devido ao aumento da biomassa (JARRELL e BEVERLY, 1981).

Todos os nutrientes, com menor intensidade para o K e o B, sofrem o efeito da diluição. Entretanto, a quantidade acumulada no fruto é crescente. As concentrações foliares diminuem à medida que os frutos

amadurecem, sendo uma das principais causas de queda das folhas. Isto sugere que, em anos de grandes produções, o desfolhamento pode ser mais intenso. A queda acentuada de folhas pode provocar prejuízos à produção, que, no caso do cafeeiro, se reflete, principalmente, na colheita do ano seguinte (MAESTRI e BARROS, 1977).

Embora o Al seja considerado um dos principais fatores limitantes da produção, recentemente tem sido amplamente discutido o seu real efeito sobre o cafeeiro.

Em trabalho realizado por RODRIGUES (1997), raízes de plantas de café Catuaí e Icatu cresceram em camadas de solo com saturações de Al de até 93%. Observou-se que cafeeiros cultivados em solo com a camada de 0-12 cm corrigida e sem restrição hídrica não apresentaram problemas nutricionais, independentemente do teor de Al encontrado no subsolo.

Os teores de Al^{3+} correspondentes às doses de calcário necessárias para obtenção de 95% da produção máxima de matéria seca total de cafeeiros variaram de 0,02 a 1,04 $cmol_c dm^{-3}$ (FREITAS, 1998). Nos dois solos mais produtivos, os teores de Al^{3+} correspondentes a essas doses aproximaram-se de 1,0 $cmol_c dm^{-3}$, sendo esses solos os que apresentaram os maiores teores de matéria orgânica (4,30 e 7,09 $dag kg^{-1}$), o que pode ter contribuído para a redução da atividade do Al em solução. O autor concluiu que, na fase inicial de crescimento, o cafeeiro tolera maiores teores de Al^{3+} que o preconizado para a cultura (0,3 $cmol_c dm^{-3}$).

CLÍSTENES et al. (1997) obtiveram resultados que sugerem que os efeitos nocivos do alumínio sobre a produção de matéria seca de cafeeiros estiveram mais relacionados com a diminuição na absorção de fósforo do que com os efeitos tóxicos daquele elemento.

A toxidez de Al tem sido associada ao acúmulo de fósforo no Sistema radicular e aos baixos teores na parte aérea, que apresentam, com bastante freqüência, sintomas de deficiência (Macklon e Sim, 1992, citados por BRACCINI et al., 1998). O alumínio precipita-se com o

fósforo no apoplasto radicular, reduzindo sua translocação para a parte aérea (CALBO e CAMBRAIA, 1980). BRACCINI et al. (1998) observaram elevação de 15,4%, do teor de fósforo nas raízes na presença de alumínio. Além disso, o alumínio pode reduzir a solubilidade do fósforo na solução externa às raízes, tornando-o menos disponível para as plantas (PAVAN e BIRGHAM, 1982; CAMARGO, 1985).

O alumínio absorvido pelas raízes do cafeeiro liga-se a sítios de adsorção na parede celular, e sobre essa superfície o fosfato se precipita (LONDOÑO e VALENCIA, 1983).

Portanto, os desarranjos metabólicos provocados pelo alumínio parecem estar mais relacionados com os efeitos deletérios deste elemento sobre a disponibilidade, absorção e utilização de diversos nutrientes, particularmente do fósforo e do cálcio.

3. O SISTEMA

O Sistema tem por objetivo determinar a quantidade de nutrientes a ser aplicada à cultura do cafeeiro com base no balanço nutricional, isto é, na diferença entre a quantidade de nutrientes necessária para a produção de biomassa vegetativa (matéria seca da parte vegetativa) e de frutos (matéria seca de frutos) e a quantidade de nutrientes disponível no solo.

O Sistema é composto por uma série de etapas (Figura 1).

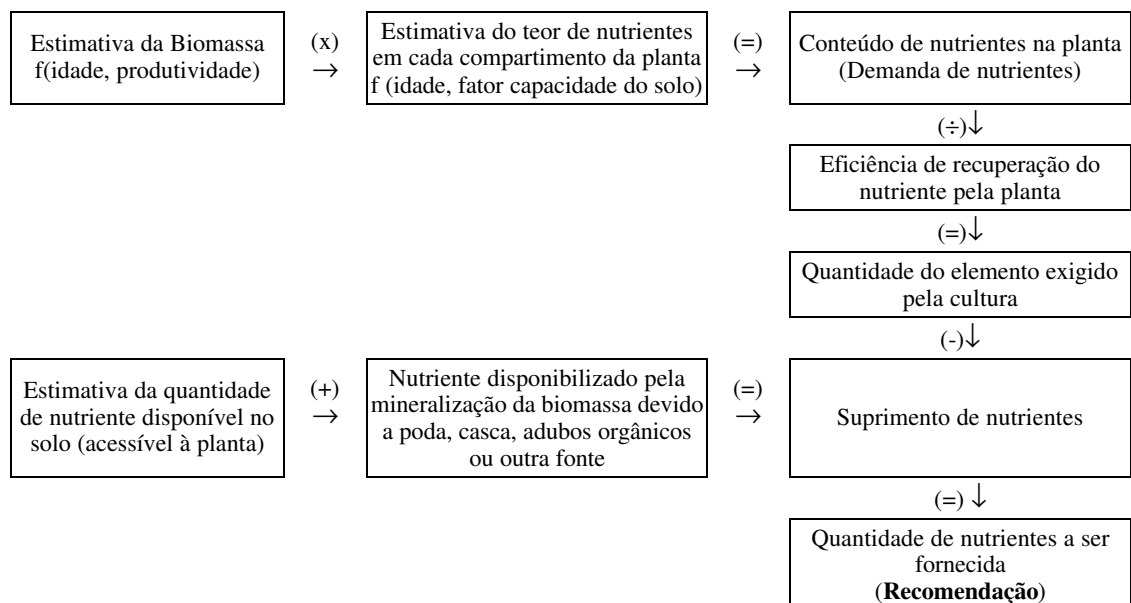


Figura 1 - Fluxograma das etapas que compõem o Sistema.

3.1. Fertilização do substrato para a produção de mudas

A quantidade de nutrientes que o substrato deve conter para o bom desenvolvimento de mudas de cafeeiro foi estimadas com base nos teores utilizados por FREITAS (1998). Para os elementos N, K e B consideram-se as doses de 300, 250 e 0,4 mg dm⁻³, respectivamente. Os níveis críticos dos elementos P, S e Zn, por serem influenciados pelo fator capacidade dos solos, foram multiplicados pelas taxas de recuperação dos seus respectivos extratores (Quadro 1). As equações de estimativa da eficiência de recuperação dos nutrientes pelos seus respectivos extratores são apresentadas com maiores detalhes no item 3.6.

Os elementos Ca e Mg serão fornecidos pelo calcário em dose estimada pelos métodos da saturação por bases, para atingir saturação por bases igual a 60%, ou pelo método da neutralização do Al³⁺ e fornecimento de Ca²⁺ e Mg²⁺, considerando-se os valores de Y e X citados no item 3.12. Caso o usuário não disponha da análise do solo, o Sistema estima a quantidade de calcário necessária para atingir 460 mg dm⁻³, ou 2,3 cmol_c dm⁻³, de Ca²⁺ e 140 mg dm⁻³, ou 1,2 cmol_c dm⁻³, de Mg²⁺.

A dose recomendada de N deve ser aplicada em cobertura, parcelada durante o período de permanência da muda no viveiro.

A quantidade de nutrientes a ser aplicada será estimada a partir da diferença entre o nível crítico de cada nutriente e o seu teor no solo, considerando-se a proporção de solo no substrato. Caso sejam utilizados fertilizantes orgânicos, o Sistema contabiliza seu teor total de nutrientes.

Quadro 1 - Equações para estimar os níveis críticos (NiCri) de P, S e Zn (mg dm^{-3}) no solo utilizado para confecção do substrato para a produção de mudas de café arábica em função do fósforo remanescente ($\text{PR}_{60}^{(1)}$),

Nutriente	Equação ⁽²⁾
P	$\text{NiCri}_{(\text{Mehlich-1})} = 90,585 - 0,3018 \text{ PR}_{60} + 0,1138 (\text{PR}_{60})^2$ $\text{NiCri}_{(\text{Resina})} = 101,31 + 1,87 \text{ PR}_{60}$
S	$\text{NiCri}_{(\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2)} = 10,8 + 1,539 \text{ PR}_{60}$
Zn	$\text{NiCri}_{(\text{Mehlich-1})} = 1,4412 - 0,00936 \text{ PR}_{60} + 0,0004796 (\text{PR}_{60})^2$

⁽¹⁾ Fósforo remanescente (mg L^{-1}) como estimador do fator capacidade do solo.

⁽²⁾ Equações obtidas a partir das doses dos elementos utilizadas por FREITAS (1998) e a taxa de recuperação do nutriente pelo extrator, conforme equações descritas no item 3.6.

3.2. Adubação de cova de plantio

Para o cálculo da quantidade de nutrientes a ser aplicada na cova de plantio, são considerados os mesmos níveis críticos utilizados para o substrato para produção de mudas.

A quantidade de nutriente é estimada, para o volume de solo, em 64 dm^3 por cova. Nos casos em que o volume da cova for menor, o Sistema recomenda aplicar em cobertura o complemento da quantidade de nutrientes calculada para 64 dm^3 .

Na implantação de lavouras não-irrigadas não se recomenda a aplicação de N e K na cova de plantio, em razão do elevado poder de salinização das fontes minerais destes nutrientes (principalmente uréia e cloreto de potássio), o que pode causar a morte das mudas. Assim, eles devem ser aplicados em cobertura após o pegamento das mudas, parcelando-se a dose recomendada em três aplicações, distribuídas durante o período chuvoso.

3.3. Recomendação de adubação de formação e de produção

A partir do primeiro ano, o Sistema calcula a quantidade de nutriente necessária para a produção de biomassa vegetativa e de biomassa de frutos. Para isso, são estimados os ganhos anuais de biomassa vegetativa, em função da idade e da população de plantas, e a biomassa de frutos, calculada em função da produtividade potencial.

3.3.1. Estimativa da produção de biomassa vegetativa

Com base em experimentos e medições realizadas em lavouras conduzidas em condições favoráveis ao bom desenvolvimento das plantas e em trabalhos realizados por GARCIA (1980) e (CORRÊA et al., 1986), foram obtidos os dados do Quadro 2.

Relacionando a produção de biomassa vegetativa por hectare em função da população, obtêm-se as equações de regressão por faixa de idade (Quadro 3).

Em lavouras com idade superior a sete anos, o Sistema considera, empiricamente, uma taxa de crescimento vegetativo anual da biomassa total de 15%. Há necessidade de trabalhos de pesquisa para confirmar essa informação, incluindo a avaliação do efeito da bianuidade do cafeeiro sobre essa taxa de crescimento vegetativo.

Quadro 2 - Produção cumulativa de biomassa vegetativa da população de café arábica var. Catuaí (parte aérea + raiz) em função da idade e da densidade de plantas

Idade	População (plantas ha ⁻¹)									
	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000	7.000	8.000	9.000	10.000
ano	kg ha ⁻¹ de matéria seca									
1	536	1.072	1.608	2.144	2.680	3.216	3.752	4.288	4.824	5.360
2	2.760	5.220	7.280	9.040	10.450	11.526	12.257	12.656	12.708	12.430
3	4.588	8.416	12.024	15.000	17.460	19.410	20.839	21.760	22.158	22.040
4	6.171	12.082	16.821	21.092	24.695	27.624	29.890	31.488	32.418	32.680
5	7.994	14.960	21.261	26.772	31.495	35.436	39.004	40.944	42.525	43.310
6	9.807	18.634	26.478	33.336	39.230	44.130	48.048	51.000	52.956	53.940
7	11.984	22.768	32.355	40.744	47.935	53.922	58.723	62.312	64.710	65.910

Fonte: GARCIA (1980) e (CORRÊA et al., 1986).

Quadro 3 - Equações de regressão para estimar a biomassa vegetativa (BV, em kg ha⁻¹) da população de café arábica var. Catuaí (parte aérea + raiz) em função da densidade de plantas (Pop, em plantas ha⁻¹), para diferentes idades

Idade	Equação ⁽¹⁾
ano	
1	BV = 0,536 Pop (Eq. 1)
2	BV = 1,2657 + 2,9377 Pop - 0,0002 Pop ² (Eq. 2)
3	BV = 0,1888 + 4,7757 Pop - 0,0003 Pop ² (Eq. 3)
4	BV = 3,2098 + 6,6169 Pop - 0,0003 Pop ² (Eq. 4)
5	BV = 1,3217 + 8,2918 Pop - 0,0004 Pop ² (Eq. 5)
6	BV = 0,8392 + 10,296 Pop - 0,0005 Pop ² (Eq. 6)
≥ 7	BV = 0,1678 + 12,582 Pop - 0,0006 Pop ² (Eq. 7)

⁽¹⁾ Os coeficientes de determinação (R² = 1) das equações não são citados, em razão dos ajustes terem sido obtidos por cálculo matemático.

O efeito linear observado no primeiro ano (Eq. 1) ocorre em razão da não-competição entre plantas. O efeito quadrático a partir do segundo ano evidencia o efeito competitivo entre plantas, proporcionando menor produção de biomassa/planta, embora com aumento da produção de biomassa/área.

Considerando que os teores de nutrientes diferem entre as partes da planta de café, há necessidade de estimar a biomassa dessas diversas partes para calcular o conteúdo total de nutrientes. Para isso, com base nos trabalhos de GARCIA (1980) e CORRÊA et al. (1986), determinou-se a distribuição percentual de biomassa entre as diferentes partes da planta (Quadro 4), o que estima a partição da biomassa (Quadro 2).

Quadro 4 - Distribuição percentual da biomassa vegetativa entre as diversas partes da planta de café arábica var. Catuaí, em função da idade

Parte da planta	Idade (ano)			
	1	2	3	≥ 4
	%			
Folha	45	45	34	22
Galhos	18	24	30	26
Caule	18	16	20	36
Raiz	19	15	16	16

Fonte: GARCIA (1980) e CORRÊA et al. (1986).

3.3.2. Estimativa da biomassa de frutos

A biomassa dos frutos é constituída pela biomassa de grãos e de casca. A biomassa de grãos corresponde à produção de grãos corrigida para 12% de umidade, que é adequada para o armazenamento (COSTA, 1995), sendo estimada por meio da equação:

$$BG = MSSC \times Pr \quad (\text{Eq. 8})$$

em que

BG = biomassa de grãos (kg ha^{-1});

MSSC = matéria seca por saca de café beneficiado (sc) =
 $60 \text{ kg sc}^{-1} - (60 \text{ kg sc}^{-1} \times 0,12 \text{ (umidade)}) = 52,8$; e

Pr = produtividade (sc ha^{-1}).

A biomassa da casca é estimada considerando-se uma relação de 108 kg de café em coco (3 sacas de 36 kg) para uma saca de café beneficiado de 60 kg (relação média observada na prática). Portanto, para cada saca de café beneficiado, têm-se 48 kg de casca. Corrigindo-se para 12% de umidade na casca, obtém-se a seguinte equação:

$$BC = MSC \times Pr \quad (\text{Eq. 9})$$

em que

BC = biomassa de casca (kg ha^{-1});

MSC = matéria seca da casca de café =
 $48 \text{ kg sc}^{-1} - (48 \text{ kg sc}^{-1} \times 0,12 \text{ (umidade)}) = 42,2$; e

Pr = produtividade (sc ha^{-1}).

3.4. Estimativa da demanda de nutrientes

A quantidade de nutrientes imobilizada anualmente pela cultura é aquela contida na biomassa vegetativa total (folhas + galhos + caule + raízes) e a contida na biomassa de frutos (grãos + casca). Para o cálculo da demanda, é importante considerar separadamente as partes da planta, pois os teores de nutrientes são diferentes em cada parte, além de serem variáveis com a idade e com o fator capacidade do solo. Além disso, a subdivisão é necessária, para facilitar o cálculo da quantidade de nutrientes retornados ao solo por meio de podas ou de casca de café.

Os teores de nutrientes utilizados pelo Sistema para a realização dos cálculos do conteúdo de nutrientes na planta são valores médios obtidos na literatura (MORAES et al., 1964; GALLO et al., 1971; GARCIA, 1980; CHAVES e SARRUGE, 1984; CORRÊA et al., 1986; PREZOTTI, 1995; SANTINATO et al., 1998; COMISSÃO...-CFSEMG, 1999) e em experimentos conduzidos em condições necessárias ao bom desenvolvimento das plantas.

Os teores de N e de P da folha do cafeeiro diminuem com a idade, devido ao efeito de diluição. O mesmo certamente acontece com os demais nutrientes nas outras partes da planta, porém não foi possível verificar essas variações com as informações disponíveis.

O teor médio de N em plantas de um ano é de 3,6 dag kg⁻¹, com dois anos é de 3,3 e com três anos ou mais é de 3,0. Os teores de N nas demais partes do cafeeiro são considerados constantes: 1,37 dag kg⁻¹ no galho; 1,22 no caule, 1,47 na raiz, 2,44 no grão e 1,8 na casca.

Os teores de P na folha, no grão e na casca são estimados por equações (Quadro 5). Teores de P considerados constantes pelo Sistema: 0,11 dag kg⁻¹ no galho e 0,10 no caule e na raiz.

Os teores de S e Zn na folha, no grão e na casca são estimados por equações (Quadro 6). Teores de S considerados constantes pelo Sistema: 0,05 dag kg⁻¹ no galho, 0,04 no caule e 0,09 na raiz; e os de Zn: 16 mg kg⁻¹ no galho, 4 no caule e 18 na raiz.

Quadro 5 - Equações para estimativa dos teores de P na folha, nos grãos e na casca de café arábica var. Catuaí (dag kg^{-1}), em função do PR_{60} (mg L^{-1}), para as diferentes idades

Idade	Parte da planta	Equação	
ano			
1	Folha	$P = 0,224 + 0,0012 \text{ PR}_{60}$	(Eq. 10)
2	Folha	$P = 0,196 + 0,0008 \text{ PR}_{60}$	(Eq. 11)
≥ 3	Folha	$P = 0,156 + 0,0008 \text{ PR}_{60}$	(Eq. 12)
	Grão	$P = 0,185 + 0,0010 \text{ PR}_{60}$	(Eq. 13)
	Casca	$P = 0,156 + 0,0008 \text{ PR}_{60}$	(Eq. 14)

Os teores dos nutrientes P, S e Zn em folhas, grãos e casca, por serem influenciados pelo fator capacidade (FC) dos solos, são estimados em função do fósforo remanescente (PR_{60}). Essas relações foram obtidas relacionando-se o menor valor da faixa de nível crítico de cada elemento, encontrado na literatura, com o valor de $\text{PR}_{60} = 5 \text{ mg L}^{-1}$ (solos muito argilosos) e o maior valor da faixa de nível crítico com o valor de $\text{PR}_{60} = 55 \text{ mg L}^{-1}$ (solos muito arenosos), como sugerem NOVAIS e SMYTH (1999).

Por carência de informações de pesquisa, os teores adequados de K, Ca, Mg, B, Cu, Fe e Mn, nas diversas partes da planta, são considerados constantes (Quadro 7).

O conteúdo de nutrientes na matéria seca total das plantas é calculado pela multiplicação da matéria seca de cada parte da planta pelo seu respectivo teor de nutriente.

Quadro 6 - Equações de estimativa dos teores de S e Zn na folha, no grão e na casca de café arábica var. Catuaí (dag kg⁻¹), em função do PR₆₀ (mg L⁻¹)

Parte da planta	Equação	
Folha	$S = 0,145 + 0,0001 PR_{60}$	(Eq. 15)
Grão	$S = 0,068 + 0,0004 PR_{60}$	(Eq. 16)
Casca	$S = 0,078 + 0,0004 PR_{60}$	(Eq. 17)
Folha	$Zn = 14,5 + 0,10 PR_{60}$	(Eq. 18)
Grão	$Zn = 3,8 + 0,04 PR_{60}$	(Eq. 19)
Casca	$Zn = 12,6 + 0,08 PR_{60}$	(Eq. 20)

Quadro 7 - Teores de K, Ca, Mg, B, Cu, Fe e Mn nas diversas partes da planta de café arábica var. Catuaí

Parte da planta	K	Ca	Mg	B	Cu	Fe	Mn
	— dag kg ⁻¹ —			— mg kg ⁻¹ —			
Folha	2,35	1,25	0,42	65	12	135	75
Galho	1,26	0,80	0,18	25	20	99	35
Caule	1,24	0,60	0,16	14	15	137	72
Raiz	1,04	0,53	0,20	25	20	190	109
Grão	1,96	0,24	0,31	8	16	17	40
Casca	3,24	0,44	0,16	23	40	94	59

Fonte: MORAES et al., 1964; GALLO et al., 1971); GARCIA, 1980; CHAVES e SARRUGE, 1984; CORRÊA et al., 1986; PREZOTTI, 1995; SANTINATO et al., 1998; CFSEMG, 1999).

3.5. Eficiência de recuperação de nutrientes pela planta

A eficiência de recuperação de nutrientes pelo cafeeiro é influenciada pela sua idade, pela quantidade de plantas por área (população) e, para alguns nutrientes, pelo FC do solo. Plantas jovens, devido ao seu reduzido Sistema radicular, geralmente apresentam baixa eficiência de recuperação, principalmente para elementos de baixa mobilidade no solo. Como consequência, exigem elevados teores de nutrientes no solo. Em lavouras adensadas, por causa da maior exploração do solo pelas raízes, a eficiência de recuperação dos nutrientes pelas plantas é maior que em lavouras mais espaçadas (PAVAN et al., 1994). Solos argilosos também contribuem para reduzir a eficiência de recuperação de nutrientes, principalmente de P, S e Zn, os quais são adsorvidos com maior energia pelo solo, reduzindo sua disponibilidade para as plantas (NOVAIS e SMYTH, 1999).

Dada a carência de pesquisa que indique com maior exatidão a eficiência de recuperação dos nutrientes pela planta de café, foram feitas estimativas, tomando-se por base as quantidades médias de nutrientes recomendadas nos estados de Minas Gerais, São Paulo, Espírito Santo e Paraná e a quantidade de nutrientes contida na biomassa vegetativa (considerando-se uma taxa de crescimento médio anual de 15% para lavouras com idade superior a sete anos) e a biomassa de frutos (considerando-se a produtividade esperada). A eficiência foi estimada pela relação: conteúdo do nutrientes na planta/quantidade do nutriente aplicado. Os valores obtidos foram considerados como eficiência de recuperação média. Considerou-se, empiricamente, uma redução de 20% dessa eficiência para lavouras com baixa densidade populacional (1.000 plantas ha⁻¹) e aumento de 20% para lavouras com alta densidade populacional (10.000 plantas ha⁻¹). A mesma amplitude de variação foi considerada para a eficiência de absorção de P, S e Zn para lavouras conduzidas em solos muito argilosos (PR₆₀ = 5 mg L⁻¹) e lavouras conduzidas em solos muito arenosos (PR₆₀ = 55 mg L⁻¹) (Quadro 8).

Quadro 8 - Equações de regressão para eficiência de recuperação de nutrientes pela planta de café arábica var. Catuaí (ER, %), em função da população de plantas (POP, pl ha⁻¹) e do P remanescente (PR₆₀, mg L⁻¹)

Nutriente	Equação ⁽¹⁾	R ²	
N	ER = 47,778 + 0,0022 Pop	(²)	(Eq. 21)
P	ER = 13,066 + 0,001686 Pop + 0,3886 PR ₆₀	0,953	(Eq. 22)
K	ER = 50,778 + 0,0022 Pop	(²)	(Eq. 23)
Ca	ER = 15,222 + 0,0018 Pop	(²)	(Eq. 24)
Mg	ER = 24,00 + 0,002 Pop	(²)	(Eq. 25)
S	ER = 11,569 + 0,00172 Pop + 0,207 PR ₆₀	0,972	(Eq. 26)
Zn	ER = -1,625 + 0,000742 Pop + 0,0887 PR ₆₀	0,949	(Eq. 27)
Cu	ER = 9,444 + 0,0016 Pop	(²)	(Eq. 28)
B	ER = 12,667 + 0,0013 Pop	(²)	(Eq. 29)

⁽¹⁾ Equações obtidas com base nas quantidades médias de nutrientes recomendadas nos estados de Minas Gerais, São Paulo, Espírito Santo e Paraná e a quantidade de nutrientes contida na biomassa vegetativa (considerando-se uma taxa de crescimento médio anual de 15% para lavouras com idade superior a sete anos) e na biomassa de frutos (considerando a produtividade esperada).

⁽²⁾ Ajuste entre dois pontos (R²=1).

3.6. Determinação da quantidade de nutrientes do solo

Os teores de nutrientes determinados pela análise do solo são valores que não indicam a quantidade que a planta pode absorver. Conhecendo-se, porém, a taxa de sua recuperação pelo extrator, isto é, a relação entre a quantidade do nutriente aplicado ao solo que é recuperada pelo extrator e os fatores que governam esta relação, pode-se estimar a quantidade de nutriente do solo. Para isso, foram agrupadas informações de diversos trabalhos de recuperação de nutrientes por extratores de uso mais comum, em função da quantidade do nutriente aplicado. Para alguns nutrientes, como P, S e Zn, as taxas de recuperação foram relacionadas com características do solo que refletem seu FC.

3.6.1. Teor de fósforo pelo Mehlich-1 em função da dose de fósforo adicionada

Os dados foram obtidos dos trabalhos de DELAZARI (1979), GUSS (1988), MELLO (1991), FONSECA (1995) e NOVELINO (1999). Esses autores aplicaram doses crescentes de P a amostras de diferentes solos e, após um período de equilíbrio, analisaram o P, utilizando o extrator Mehlich-1. Com isso, obtiveram uma função que relaciona P recuperado pelo Mehlich-1 em função do P aplicado. Entretanto, alguns desses autores utilizaram doses muito elevadas, chegando aproximadamente a 5.100 mg dm^{-3} de P, obtendo-se, por essa razão, funções com tendência curvilínea crescente. Como o objetivo deste trabalho foi obter a declividade dentro de uma faixa de doses normalmente empregada na agricultura, utilizou-se a porção retilínea que, geralmente, compreendia doses inferiores a 850 mg dm^{-3} de P no solo.

As declividades da porção retilínea, obtidas para cada solo, quando relacionadas com seu respectivo PR_{60} , apresentavam baixo coeficiente de determinação ($R^2 = 0,263$), indicando que outra variável pode estar influenciando a relação, como por exemplo o pH do solo, o qual, quando em valores elevados, favorece a exaustão do extrator (desgaste), reduzindo seu poder de extração do P (NOVAIS e SMYTH, 1999).

A função foi obtida utilizando-se os dados dos trabalhos de GUSS (1988), MELLO (1991), FONSECA (1995) e NOVELINO (1999) (Figura 2).

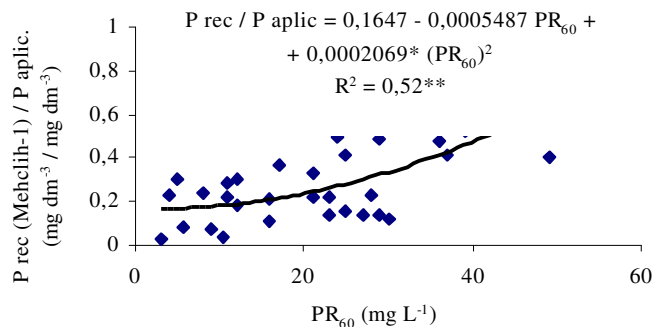


Figura 2 - Relação entre o fósforo recuperado pelo Mehlich-1 e o fósforo aplicado em função do fósforo remanescente (PR₆₀).

3.6.2. Teor de fósforo recuperado pela resina de troca aniônica em função da dose de fósforo adicionada

A função que relaciona o P recuperado pela resina de troca aniônica e o P aplicado (Figura 3) foi obtida com dados dos trabalhos de GONÇALVES (1988), MOREIRA (1988), MOURA FILHO (1990) e NOVELINO (1999).

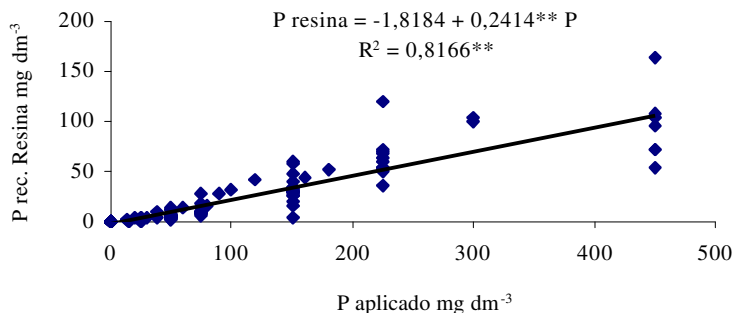


Figura 3 - Taxa de recuperação de fósforo pela resina de troca aniônica em função do fósforo aplicado.

A função segue tendência linear, com uma taxa de recuperação média (declividade) de 24,14%. Em razão da grande dispersão dos pontos, relacionou-se a taxa de recuperação com o PR_{60} dos solos (Figura 4), comprovando a influência do fator capacidade sobre a taxa de recuperação de fósforo pela resina.

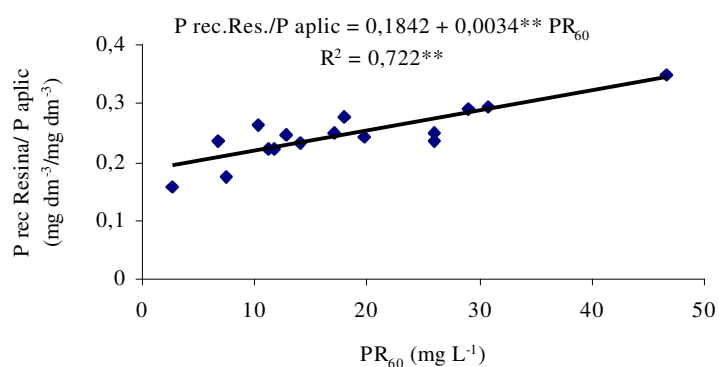


Figura 4 - Taxa de recuperação de fósforo pela resina de troca aniônica do fósforo aplicado em função do PR_{60} .

3.6.3. Estimativa do PR_{60} em função do teor de argila

O valor de P remanescente (PR_{60}) do solo é uma variável que indica a capacidade do solo em adsorver P e dá um indicativo da atividade da argila. Assim, para que se possa estimar o PR_{60} dos solos em função do seu teor de argila, foram agrupados os dados de FONSECA (1987), DELAZARI (1979), SILVA (1990), MELLO (1991), VIÉGAS (1991), FERNÁNDES ROJAS (1992), DIAS (1992), RODRIGUES (1993), CAMPELLO (1993), VILLANI (1995), FREIRE (1996), RIVAS YUPANQUI (1997), OLIVEIRA (1998), ROLIM (1998), FERREIRA (1998) e FREITAS (1998) (Figura 5).

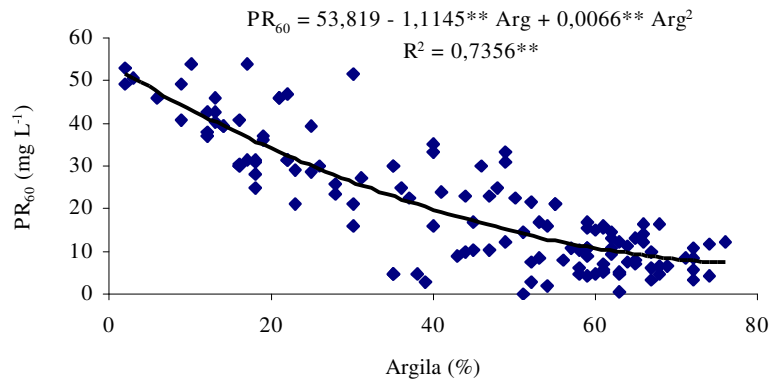


Figura 5 - Valor do fósforo remanescente (PR_{60}) em função do teor de argila.

Embora a função apresente $R^2 = 0,736$, observa-se considerável dispersão de pontos, em que, por exemplo, um solo com teor de argila próximo a 30% apresenta a estimativa de PR_{60} variando de 16,1 a 51,7 mg L^{-1} . Isso indica que a qualidade de argila é característica tão importante quanto a quantidade, como medida do FC de P do solo.

3.6.4. Teor de potássio pelo Mehlich-1 em função da dose de potássio adicionada

Esta função foi obtida pelo agrupamento de dados dos trabalhos de ANDRADE (1975), PREZOTTI (1985), GARCIA PEÑA (1991) e MORAIS (1999) (Figura 6).

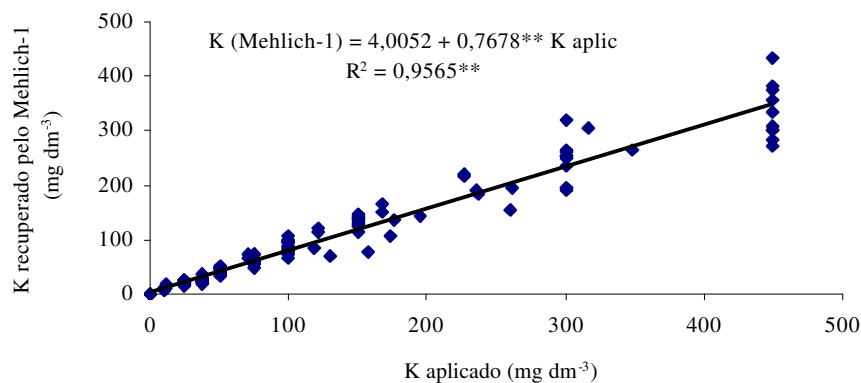


Figura 6 - Teor de potássio recuperado pelo Mehlich-1 em função de doses de potássio aplicadas.

3.6.5. Cálcio trocável em função da dose de cálcio adicionada

A função foi obtida com dados dos trabalhos de PORTELA (1984), SILVA (1986), LOUZADA (1987), GARCIA PEÑA (1991), MENDONÇA (1992), ALCOFORADO (1992) e FREITAS (1998) (Figura 7).

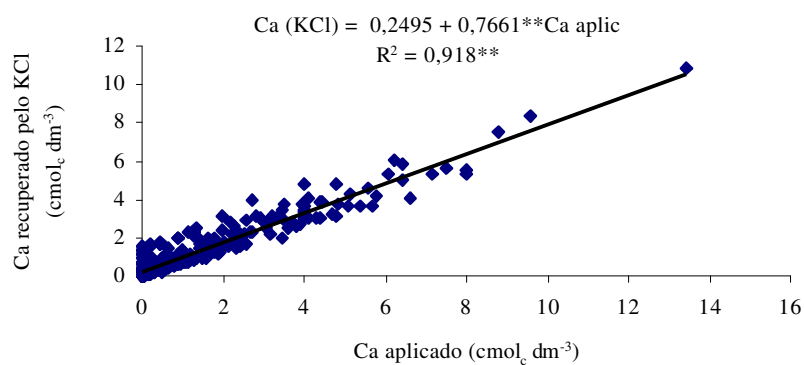


Figura 7 - Teor de cálcio trocável recuperado pela extração com solução de KCl em função de doses de Ca aplicadas.

3.6.6. Magnésio trocável em função da dose de magnésio adicionada

Para magnésio trocável, a função foi obtida com dados dos trabalhos de PORTELA (1984), SILVA (1986), LOUZADA (1987), GARCIA PEÑA (1991), ALCOFORADO (1992) e FREITAS (1998) (Figura 8).

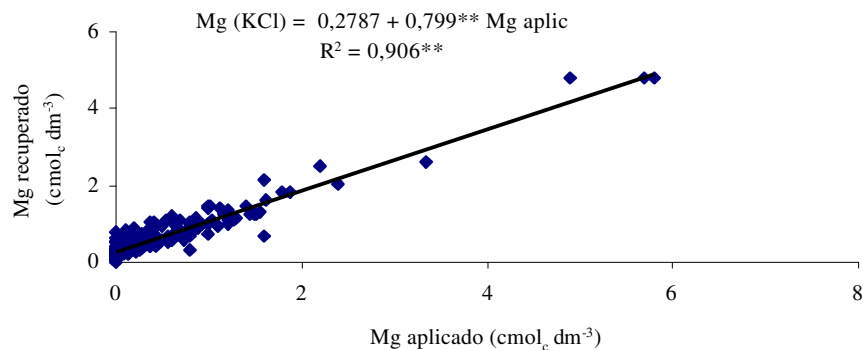


Figura 8 - Teor de magnésio trocável recuperado com solução de KCl em função de doses de magnésio aplicadas.

Nas funções obtidas para K disponível e Ca e Mg trocáveis, observa-se grande semelhança da declividade que expressa a taxa de recuperação do nutriente pelo extrator: K (76,78%); Ca (76,61%) e Mg (79,90%). Esse fato indica que tanto o Mehlich-1, para o K, como o KCl 1 mol L⁻¹, para o Ca e Mg, possuem poder de extração semelhante e que parte do nutriente aplicado não é recuperada pelo extrator (aproximadamente 20%). SANZ-SCOVINO et al. (1992), trabalhando com solos tropicais, observaram fixação de cerca de 20% do potássio aplicado. Segundo MARTIN e SPARKS (1985) e KIRKMAN et al. (1994), o

potássio pode ser fixado em micas intemperizadas. Nessas áreas, os cátions com menor energia de hidratação, como o K, podem penetrar mais profundamente nas camadas, atingindo locais mais estreitos (sítios de adsorção específica), onde os cátions com maior raio hidratado e alta energia de hidratação (Ca e Mg) não conseguem chegar.

Sobre a presença de micas em solos intemperizados, MELO (1998) concluiu que a quantidade de mica nas frações silte e argila de solos tropicais pode ser tão baixa que o mineral não é detectado por raio X; entretanto, mesmo em pequenas quantidades, os minerais micáceos podem contribuir significativamente para a fixação de K.

3.6.7. Taxa de recuperação do enxofre aplicado pelo $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ em HOAc, em função do PR_{60}

O S em contato com o solo apresenta comportamento semelhante ao P, tornando-se menos acessível ao extrator (desgaste). A capacidade de recuperação do extrator é inversamente proporcional ao fator capacidade do solo, medida pelo PR_{60} . Assim, em trabalho realizado por ALVAREZ V. et al. (1983), a declividade da função da taxa de recuperação do enxofre aplicado (mg dm^{-3}) pelo $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ em HOAc (mg dm^{-3}) foi relacionada com o PR_{60} dos solos estudados, obtendo-se a seguinte função:

$$\Delta S \text{ rec} / \Delta S \text{ aplic} = 0,040 + 0,0057 \text{ PR}_{60} \quad (R^2 = 0,955) \quad (\text{Eq. 30})$$

Por esta função, observa-se que, para um solo com $\text{PR}_{60} = 20 \text{ mg L}^{-1}$, o extrator recupera apenas 15,4% do S aplicado. Em trabalho realizado por FONTES et al. (1982), a recuperação de S em solo com esta mesma característica foi de 31,2%. SOUZA (1999) obteve uma função em que esta recuperação foi de 51,13%. Essas diferentes taxas de recuperação, possivelmente, estão ligadas ao desgaste do extrator proporcionado por diferentes valores de pH e de FC dos solos, tempo de equilíbrio solo-extrator, forma de aplicação e fonte de S, etc.

3.6.8. Taxa de recuperação do enxofre pela resina de troca aniônica em função da dose de enxofre aplicada

Os dados utilizados para esse relacionamento foram obtidos de ACCIOLY (1995) (Figura 9).

A taxa média de recuperação de S pela resina foi de 24,5%. Entretanto, a amplitude de variação foi de 15 a 48%, indicando que, mesmo para a resina, existe outro fator influenciando a taxa de recuperação do extrator.

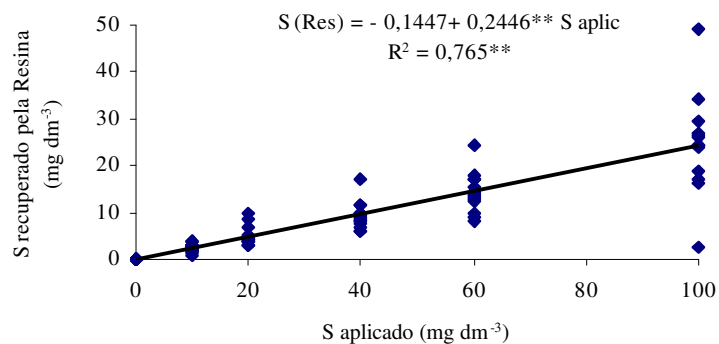


Figura 9 - Teor de enxofre recuperado pela resina de troca aniônica em função de doses de S aplicadas.

3.6.9. Teor de boro recuperado pela água quente em função de doses de boro aplicadas

Os dados para esta função foram obtidos do trabalho de FERREIRA (1998) (Figura 10).

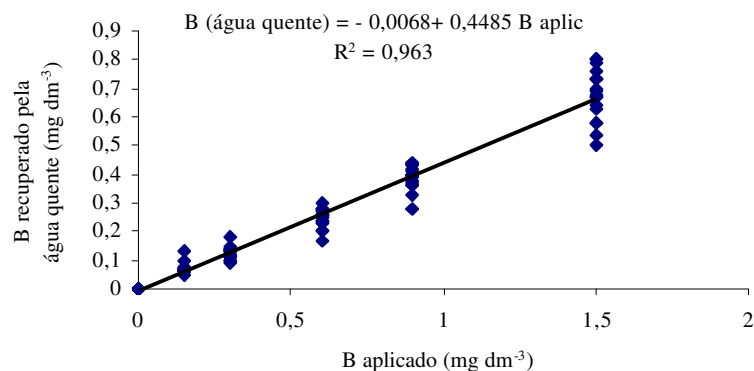


Figura 10 - Teor de boro recuperado pela água quente em função de doses de B aplicadas.

A taxa de recuperação média foi de 44,8%. Observou-se bom ajustamento ($R^2 = 0,964$), indicando pouca influência de características dos solos na taxa de recuperação de B pela água quente.

3.6.10. Taxa de recuperação por extratores de cobre em função de doses de cobre adicionadas

Observa-se ampla variação da taxa de recuperação de Cu pelos diferentes extratores para os diferentes solos, com amplitude de 5 a 126% para o DTPA e de 8 a 105% para o Mehlich-1 (Quadro 9). Taxas de recuperação superiores a 100% não são compreendidas, embora sugiram taxas crescentes de liberação do nutriente pelos minerais do solo, de formas anteriormente não-lábeis, à medida que se aumenta a dose do elemento. Assim, com os dados disponíveis, fica difícil a estimativa de uma taxa média de recuperação de Cu por um determinado extrator, sendo necessários trabalhos de pesquisa que determinem as características dos solos que se relacionam com essas variações.

Na falta dessa informação, o Sistema considera, em sua primeira versão, uma taxa de recuperação de Cu pelo DTPA e pelo Mehlich-1 de 60%.

Quadro 9 - Declividades das funções de cobre recuperado por diferentes extratores em função das doses de cobre aplicadas

Autor	Solo	Declividade Cu recuperado / Cu aplicado		
		DTPA	Mehlich-1	HCl 0,1 mol L ⁻¹
		----- mg dm ⁻³ /mg dm ⁻³ -----		
GIMENEZ et al. (1992)	LEd + calagem ⁽¹⁾	0,06	0,10	
	LEd - calagem	0,08	0,10	
	LRd + calagem ⁽¹⁾	0,05	0,08	
	LRd - calagem	0,09	0,09	
BELTRAN (1998)	AQ	0,29		
	PV	0,66		
BERTONI (1997)	HO	1,26		
	HGH	0,93		
	HGP	0,91		
GALRÃO (1995)		0,18	0,63	
LIMA (1991)			1,05	
PIRES (1998)	LV	0,81		0,79
	LE	0,83		0,82

⁽¹⁾ Quantidade de calcário determinada pelo método da incubação para elevar o pH a 6,0.

3.6.11. Taxa de recuperação com Mehlich-1 do zinco aplicado em função do PR₆₀

A recuperação de Zn por um determinado extrator, à semelhança do P e do S, sofre influência do fator capacidade do solo (COUTO et al., 1992) (Figura 11).

Por essa dependência, em um solo com PR₆₀ = 20 mg L⁻¹, o Mehlich-1 recuperaria 36,1% do Zn aplicado. Para solo com esta mesma característica, MENEZES (1998) obteve taxa de recuperação de 77,8% (sem calagem) e 69,6 (com calagem). Em função obtida por RIBEIRO e SARABIA (1984), em solo com o PR₆₀ = 20 mg L⁻¹, a recuperação foi de 27,6%. LIMA (1991), trabalhando com um solo com 65% de argila, obteve taxa de recuperação de Zn pelo Mehlich-1 = 101,9%. Portanto, fica

evidente a necessidade de maior aprofundamento em estudos dessa natureza, dadas as inúmeras variáveis que influenciam a taxa de recuperação do nutriente pelos extratores. Há necessidade de confrontar os trabalhos de pesquisa para que os diferentes resultados possam ser correlacionados com características de solo e planta, de modo a explicar as diferentes tendências.

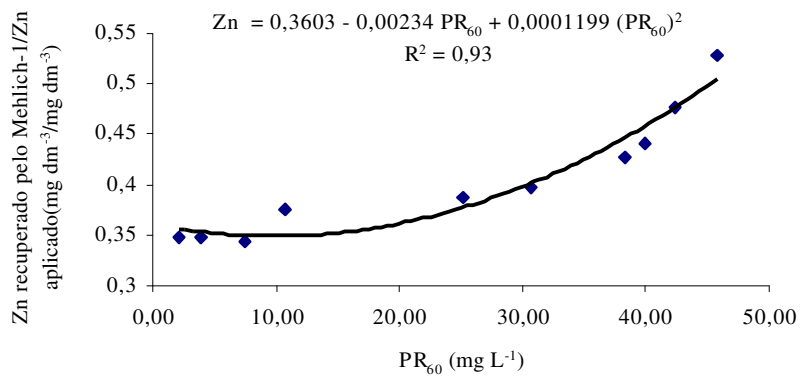


Figura 11 - Taxa de recuperação com Mehlich-1 do Zn aplicado em função do P remanescente (PR₆₀).

3.6.12. Estimativa da quantidade de nitrogênio do solo

A quantidade de N oriunda da matéria orgânica do solo, que pode se tornar disponível para a cultura, é estimada pelo Sistema utilizando-se o modelo desenvolvido por STANFORD e SMITH (1972), adaptado para solos tropicais por PARENTONI et al. (1988) e VASCONCELOS et al. (1999):

$$N_{\text{mineralizável}} = [2.000.000 \times ((\text{MO}/100)/20) \times 0,0148] e^{0,042t} \text{ (Eq. 31)}$$

em que

$2.000.000 \text{ dm}^3$ = volume de solo contido em um hectare com 0-20 cm de profundidade;

0,0148 = N potencialmente mineralizável da MO (PARENTONI et al., 1988), obtido de 30 solos do Rio Grande do Sul, incubados por 30 semanas à temperatura de 24°C;

$(\text{MO}/100)/20$ = estimativa da quantidade de N total contido na MO do solo;

e = base do logaritmo neperiano;

$0,042 \text{ semana}^{-1}$ = constante de mineralização da MO (VASCONCELOS et al., 1999) para um Latossolo Vermelho-Escuro, fase cerrado, incubado por 49 dias à temperatura de 15°C (noturno) a 24°C (diurno);

t = tempo em semanas que a cultura absorve N. Para a cultura do café, foram considerados dois meses para enfolhamento e quatro meses para formação dos frutos (t = 24 semanas) como períodos de maior demanda de N.

3.7. Suprimento de nutrientes pelo solo

Para esta estimativa, o Sistema considera a quantidade do nutriente (estimada pela divisão do seu teor pela taxa de sua recuperação pelo extrator) e o volume de solo explorado pelas raízes do cafeeiro (zona de exploração radicular), que aumenta com a idade e com a população de plantas. Em razão da carência de informações, partiu-se do pressuposto de que a maior parte do Sistema radicular do cafeeiro encontra-se sob a projeção da copa, a uma profundidade de 0-20 cm (NUTMAN, 1933). Dessa forma, com base no diâmetro da copa, em função da idade e da população de plantas, elaborou-se uma primeira aproximação para estimar o volume de solo explorado pelo Sistema radicular do cafeeiro (Quadro 10).

Quadro 10 - Equações para estimativa do volume de solo (0-20 cm) de um hectare (VS, %) explorado pelas raízes do cafeeiro arábica var. Catuaí, em função da população de plantas (POP, plantas ha⁻¹), para diferentes idades

Idade	Equação ⁽¹⁾	População acima da qual o volume de solo é explorado = 100%
ano		
1	$VS = 0,000 + 0,006 \text{ Pop}$	17.000
2	$VS = - 4,560 + 0,0161 \text{ Pop}$	6.000
3	$VS = 0,259 + 0,0249 \text{ Pop}$	4.000
4	$VS = 14,286 + 0,0297 \text{ Pop}$	3.000
≥ 5	$VS = 0,000 + 0,050 \text{ Pop}$	2.000

⁽¹⁾ Os coeficientes de determinação das equações ($R^2 = 1$) não são citados, em razão de os dados terem sido obtidos por cálculo matemático.

3.8. Quantidade de nutriente a ser aplicada (recomendação)

A recomendação é estimada pela diferença entre a quantidade de nutriente no solo exigido pela cultura e seu suprimento pelo solo. Consideram-se também os nutrientes incorporados ao solo via adubos orgânicos e retorno da casca e podas.

3.9. Teor mínimo de nutriente no solo para sustentabilidade da produção

De acordo com os cálculos neste Sistema, para estimar a quantidade de nutrientes necessária para atingir determinada produtividade potencial, esgota-se a quantidade do nutriente disponível do solo. Ao se considerar a manutenção de teores mínimos de nutrientes, o Sistema faz os cálculos de modo que o solo permaneça com teor de nutriente suficiente para atingir uma produtividade mínima desejada. Caso o usuário não forneça essa informação, o Sistema não considera a sustentabilidade.

3.10. Fertilização de lavouras recepadas

Para lavouras recém-recepadas, o Sistema recomenda a mesma quantidade de N, K e micronutrientes e a metade da dose de P recomendada para a cova de plantio. A redução da dose de P baseia-se no fato de que, após a recepa, parte do Sistema radicular permanece ativa, mantendo uma determinada taxa de recuperação que, estima-se, é superior à de mudas. O parcelamento de N e K deve ser iniciado três meses após a recepa.

Para a fertilização do primeiro ano após a recepa, o Sistema calcula a quantidade de fertilizantes com base na estimativa de produção de biomassa vegetativa de segundo ano (Eq. 2, Quadro 3) e na produtividade esperada.

3.11. Estimativa da quantidade de nutrientes disponibilizada pela biomassa vegetativa de lavouras podadas

3.11.1. Recepa

Geralmente, a recepa é o tipo de poda recomendado para lavoura que se apresenta depauperada, com baixo índice de enfolhamento. Outro fator considerado é que, com a recepa, parte do Sistema radicular permanece viva, não disponibilizando parte do seu conteúdo de nutrientes. Por essa razão, a biomassa incorporada ao solo por ocasião da recepa é estimada como igual a 70%^{1/} da produção de biomassa de lavouras com idade superior a sete anos (Eq. 7, Quadro 3).

Em razão do baixo índice de enfolhamento, o Sistema considera a seguinte relação da biomassa total: 5% de folhas, 20% de galhos, 36% de caule e 9% de raiz.

^{1/} Valores estimados com base em experiência de técnicos e produtores. Necessita de maior aprofundamento da pesquisa.

O Sistema oferece a opção de retirada do caule da área de cultivo, desconsiderando seu conteúdo de nutrientes do total a ser suprido pela recepa. A disponibilização de nutrientes dessa biomassa é proporcional à taxa de mineralização de cada compartimento da planta (Quadro 11).

Quando a recepa é feita com o objetivo de reduzir o número de plantas de lavouras adensadas (desbaste), o Sistema estima a biomassa incorporada ao solo, utilizando as relações de compartimentos citadas no Quadro 4 e as equações do Quadro 3, substituindo a variável “população de plantas” pelo número de plantas recepadas.

Quadro 11 - Taxa de mineralização das diversas partes do cafeeiro arábica var. Catuaí, de acordo com o tempo após a poda

Compartimento da planta	Período após a poda (ano)			
	1°	2°	3°	4°
	(%) ⁽¹⁾			
Folha	100	0	0	0
Galho	80	20	0	0
Caule	10	20	30	40
Raiz	50	30	20	0

⁽¹⁾ Valores estimados com base em experiência de técnicos e produtores. Necessita de maior aprofundamento da pesquisa.

3.11.2. Esqueletamento

a) Poda de um lado: o Sistema considera uma incorporação de biomassa referente a 20%^{1/} de folhas e 15^{1/} de galhos.

^{1/} Valores estimados com base em experiência de técnicos e produtores. Necessita de maior aprofundamento da pesquisa.

b) Poda dos dois lados: o Sistema considera uma incorporação de biomassa referente a 40%^{1/} de folhas e 30%^{1/} de galhos.

3.11.3. Decote

a) Poda de 1/3 da planta: o Sistema considera uma incorporação de biomassa referente 15%^{1/} de galhos e 10%^{1/} de caule.

b) Poda de 2/3 da planta: o Sistema considera uma incorporação de biomassa referente a 30%^{1/} de galhos e 20%⁽¹⁾ de caule.

A taxa de mineralização de cada compartimento da planta podado segue os valores citados no Quadro 11.

3.12. Calagem

O Sistema coloca à disposição do usuário três métodos de estimativa da necessidade de calcário. O primeiro é aquele que visa suprir somente a demanda da planta em Ca e Mg. O segundo método é o que se baseia na saturação por bases (V), visando elevá-la a 60%, quando esta for inferior a 50% (CFSEMG, 1999), utilizando a equação:

$$NC(t\ ha^{-1}) = \frac{T(60 - V_1)}{100}$$

em que

NC = necessidade de calagem (t ha⁻¹); T = CTC a pH 7,0 (cmol_c dm⁻³); e
V₁ = saturação por bases atual do solo (cmol_c dm⁻³).

^{1/} Valores estimados com base em experiência de técnicos e produtores. Necessita de maior aprofundamento da pesquisa.

O terceiro método é o que se baseia na neutralização do Al e elevação dos teores de Ca e Mg, segundo a fórmula:

$$NC \text{ (t ha}^{-1}\text{)} = Y [Al^{3+} - (m_t t/100)] + [X - (Ca^{2+} + Mg^{2+})]$$

em que

Y representa a capacidade-tampão da acidez do solo, calculada pela fórmula: $Y = 4,002 - 0,125901 PR_{60} + 0,001205 (PR_{60})^2 - 0,00000362 (PR_{60})^3$ ($R^2 = 0,999$); Al^{3+} , em $cmol_c dm^{-3}$; t é a CTC efetiva, em $cmol_c dm^{-3}$; m_t é a saturação máxima de Al^{3+} tolerada pela cultura, em %, no caso do café, $m_t = 25\%$; X é o teor de $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ requerido pela cultura. Para o cafeeiro, $X = 3,5 cmol_c dm^{-3}$ (CFSEMG, 1999).

A quantidade de calcário (QC) é estimada pela fórmula:

$$QC = NC (SC/ 100) (PF/ 20) (100/ PRNT)$$

em que

SC = superfície do terreno coberta pela calagem (%);

PF = profundidade de incorporação (cm); e

PRNT = Poder Relativo de Neutralização Total (%).

Em lavouras novas ou com espaçamento mais largo, o calcário deve ser aplicado na projeção da copa, onde está concentrada a quase totalidade do Sistema radicular do cafeeiro e o grau de acidificação é maior em função da aplicação de fertilizantes. O calcário aplicado nas ruas, além de ser pouco aproveitado pelas plantas, aumenta a mineralização da matéria orgânica, já tão escassa nos solos tropicais.

3.13. Gessagem

Em razão da impossibilidade de incorporação de calcário em lavouras já implantadas, o Sistema recomenda o uso do gesso quando a camada subsuperficial (20-40 cm) apresentar saturação por Ca^{2+} na CTC efetiva inferior a 5% e, ou, saturação por Al^{3+} (m) superior a 30%. A quantidade de gesso estimada é igual a 25% da necessidade de calagem da camada subsuperficial, sem alterar a quantidade de calcário (CFSEMG, 1999).

3.14. Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade objetiva avaliar o efeito de cada variável sobre os resultados obtidos pelo Sistema. Para isso, submete-se cada uma delas à variação, mantendo-se as demais constantes, e estima-se o efeito sobre a variável de resposta, que é a dose do nutriente recomendada.

3.15. Informações geradas pelo Sistema

- Recomendação de nutrientes para fertilização de substrato para a produção de mudas, cova de plantio, lavoura em formação e produção, lavoura recepada, em função de espaçamento, idade, produtividade, fator capacidade do solo e teor de nutrientes (considerando os extratores Mehlich-1 e resina para fósforo).
- Reciclagem de nutrientes proporcionada por podas (decote, esqueletamento, recepa e desbaste de lavoura adensada), retorno da casca de café e adubos orgânicos.
- Quantidade de calcário pelos métodos da saturação por bases, Al^{3+} e $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ e pela demanda de Ca e Mg pela cultura.

- Balanço nutricional (conteúdo de nutrientes em cada compartimento da biomassa vegetativa e frutos e suprimento de nutrientes pelo solo e pela fertilização).
- Manutenção de teores de nutrientes no solo suficientes para a sustentabilidade de uma produtividade mínima desejada pelo usuário.
- Níveis críticos de nutrientes no solo para qualquer produtividade.
- Relatórios com interpretação das análises do solo e foliar, recomendação da quantidade de calcário e gesso e de macro e micronutrientes.

4. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

Visando avaliar as normas geradas para o Sistema, são simuladas algumas situações, atribuindo-se valores considerados médios às diversas variáveis consideradas na interpretação da análise do solo e recomendação de fertilizantes. As simulações abrangem as principais fases da cultura do cafeeiro, como: fertilização de substrato para a produção de mudas, recomendação para fertilização de cova de plantio, recomendação para fertilização de primeiro e de segundo anos, recomendação para fertilização de lavouras com idade superior a dois anos e suprimento de nutrientes oriundos de poda e de casca de fruto de café. Desse modo, espera-se demonstrar as principais etapas de cálculos executadas pelo Sistema. São também apresentadas situações para variações extremas de cada variável, dando, assim, um indicativo da sua sensibilidade. Finalmente, são comparados os resultados obtidos pelo Sistema com as recomendações atualmente utilizadas por técnicos nos principais estados produtores de café do País.

4.1. Fertilização de substrato para produção de mudas

O Sistema determina a quantidade de fertilizantes a ser aplicada ao substrato, utilizado para a produção de mudas, com base nos níveis críticos de nutrientes descritos no item 3.1. Supondo-se um solo (horizonte B) com as seguintes características: P = 5 mg dm⁻³ (Mehlich-1), K = 10 mg dm⁻³, S = 5 mg dm⁻³, 0 (zero) de micronutrientes, necessidade de calcário para atingir V = 60% = 5 t ha⁻¹ e PR₆₀ = 20 mg L⁻¹, podem ser feitas as estimativas descritas a seguir:

4.1.1. Fósforo

Estimativa do nível crítico (Mehlich-1) para solo com PR₆₀ = 20 mg L⁻¹:

$$\text{NiCri}_{(\text{Mehlich-1})} = 90,585 - 0,3018 \text{ PR}_{60} + 0,1138 (\text{PR}_{60})^2 \text{ (Quadro 1)}$$

$$\text{NiCri} = 130 \text{ mg dm}^{-3}$$

A quantidade de fósforo a ser aplicada por dm³ de substrato é de 550 mg dm⁻³ (130/0,236 (eficiência de recuperação de P do solo pelo Mehlich-1 (Figura 2))). Em 1 m³ deverão ser aplicados 550 g de P (550 mg dm⁻³ x 1.000 dm³).

O suprimento de P do solo com teor de 5 mg dm⁻³ será de 21,18 mg dm⁻³ (5/0,236). Em 700 dm³ ter-se-á o suprimento de 14,83 g de P.

Dose de P = 550 - 14,83 = 535,17 g de P = 1.231 g de P₂O₅ = 6.154 g de superfosfato simples (por m³ de substrato).

4.1.2. Potássio

$$\text{Nível Crítico de K (Mehlich-1)} = 250 \text{ mg dm}^{-3}$$

A quantidade de potássio a ser aplicada por dm³ de substrato é de 550 mg dm⁻³ (250/0,768 (eficiência de recuperação de K do solo

pelo Mehlich-1 (Figura 6)). Em 1 m^3 deverão ser aplicados 325 g de K ($325 \text{ mg dm}^{-3} \times 1.000 \text{ dm}^3$).

O suprimento de K do solo com teor de 10 mg dm^{-3} será de 13 mg dm^{-3} ($10/0,768$). Em 700 dm^3 ter-se-á o suprimento de 9,1 g de K ($13 \text{ mg dm}^{-3} \times 700 \text{ dm}^3$).

Dose de K = $325 - 9,1 = 315,9 \text{ g de K} = 379 \text{ g de K}_2\text{O} = 633 \text{ g de cloreto de potássio}$ (por m^3 de substrato).

4.1.3. Cálcio e magnésio

$\text{QC} = 5 \text{ t ha}^{-1}$ (PRNT $\cong 100\%$) = $2,5 \text{ g dm}^{-3} = 2.500 \text{ g m}^{-3}$ de calcário
Suponha-se um calcário dolomítico com 38% de CaO e 12% de MgO

A quantidade de Ca fornecida pelo calcário ao substrato será de 697 g de Ca por m^3 de substrato.

A quantidade de Mg fornecida pelo calcário ao substrato será de 176 g de Mg por m^3 de substrato.

4.1.4. Enxofre

Estimativa do nível crítico [$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ em HOAc]:

$\text{NiCri} = 10,8 + 1,539 \text{ PR}_{60}$ (Quadro 1)

$\text{NiCri} = 41,58 \text{ mg dm}^{-3}$

A quantidade de S a ser aplicada por dm^3 de substrato é de 270 mg dm^{-3} ($41,58/0,154$ (eficiência de recuperação de S do solo pelo $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ em HOAc (Eq. 30))). Em 1 m^3 deverão ser aplicados 270 g de S ($270 \text{ mg dm}^{-3} \times 1.000 \text{ dm}^3$).

O suprimento de S do solo com teor de 5 mg dm^{-3} será de $32,47 \text{ mg dm}^{-3}$ ($5/0,154$). Em 700 dm^3 ter-se-á o suprimento de 22,73 g de S ($32,47 \text{ mg dm}^{-3} \times 700 \text{ dm}^3$).

Suprimento de S do superfosfato simples = 6.154 g de superfosfato simples x 0,11 (teor de S no superfosfato simples) = 677 g de S.
Dose de S = já suprida pelo superfosfato simples.

4.1.5. Boro

Nível Crítico de B (água quente) = $0,40 \text{ mg dm}^{-3}$

A quantidade de boro a ser aplicada por dm^3 de substrato é de $0,89 \text{ mg dm}^{-3}$ ($0,40/0,4485$ (eficiência de recuperação de B do solo pela água quente (Figura 10))). Em 1 m^3 deverão ser aplicados $0,89 \text{ g de B}$ ($0,89 \text{ mg dm}^{-3} \times 1.000 \text{ dm}^3$).

4.1.6. Zinco

Estimativa do nível crítico (Mehlich-1) para solo com $\text{PR}_{60} = 20 \text{ mg L}^{-1}$:

$\text{NiCri} = 1,4412 - 0,00936 \text{ PR}_{60} + 0,0004796 (\text{PR}_{60})^2$ (Quadro 1)

$\text{NiCri} = 144 \text{ mg dm}^{-3}$

A quantidade de Zn a ser aplicada por dm^3 de substrato é de 4 mg dm^{-3} ($1,44/0,361$ (eficiência de recuperação de P do solo pelo Mehlich-1 (Figura 11))). Em 1 m^3 deverão ser aplicados 4 g de Zn ($4 \text{ mg dm}^{-3} \times 1.000 \text{ dm}^3$).

4.1.7. Nitrogênio

Dose recomendada = 300 mg dm^{-3}

Dose de N a ser aplicada em 1.000 dm^3 de substrato = $300 \text{ mg dm}^{-3} \times 1.000 \text{ dm}^3 = 300 \text{ g de N}$

No caso de utilização de esterco no substrato, aplicar N somente em cobertura.

Obs.: Em caso de surgimento de sintomas de carência de Cu (folhas acosteladas e encurvadas para baixo), aplicar via pulverização com oxicloreto de cobre a 3 g L^{-1} (auxilia o controle de doenças fúngicas).

4.2. Recomendação de fertilização de cova de plantio

As quantidades de nutrientes recomendadas para a cova de plantio são proporcionais ao volume da cova e obedecem aos mesmos níveis críticos recomendados para o substrato para produção de mudas. Para a situação em que o volume da cova for de 64 dm^3 ($40 \times 40 \times 40 \text{ cm}$) e o solo apresentar as seguintes características: $\text{P} = 5 \text{ mg dm}^{-3}$, $\text{K} = 30 \text{ mg dm}^{-3}$, $\text{PR}_{60} = 20 \text{ mg L}^{-1}$, 0 (zero) de micronutrientes e $\text{NC} = 5 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário dolomítico ($\text{PRNT} = 100\%$), o Sistema recomenda a quantidade de nutrientes mostrada no Quadro 12.

Quadro 12 - Doses de nutrientes e fertilizantes a serem aplicadas na cova de plantio para o crescimento inicial de café arábica

Nutriente	Nível crítico ⁽¹⁾	Teor no solo	Quantidade	Fator de recuperação do extrator	Dose do nutriente	Quantidade de fertilizante ou corretivo por cova (64 dm^3)
		mg dm^{-3}			g/cova (64 dm^3)	
N	300	20,3 ⁽³⁾	279,7	-	17,9	89,5 g de sulfato de amônio ⁽⁴⁾
P	130	5	125	0,236 ⁽²⁾	33,9	389,9 g de superfosfato simples
K	250	30	220	0,768	18,3	36,7 g de cloreto de potássio ⁽⁴⁾
B	0,4	0	0,4	0,448	0,057	0,5 g de bórax
Zn	1,44	0	1,44	0,361 ⁽²⁾	0,255	1,3 g de sulfato de zinco
Ca e Mg						160 g de calcário ($\text{PRNT} = 100\%$)

⁽¹⁾ Valores citados no item 3.1.

⁽²⁾ Considerando-se $\text{PR}_{60} = 20 \text{ mg L}^{-1}$.

⁽³⁾ Supondo solo com 1 dag kg^{-1} de matéria orgânica e $t = 24$ semanas (Eq. 31), a quantidade de N mineralizável = $40,6 \text{ kg ha}^{-1}$ de N = $20,3 \text{ mg dm}^{-3}$ de N.

⁽⁴⁾ As quantidades de N e K devem ser divididas em três parcelas, sendo a primeira aplicada na cova de plantio e as demais em cobertura, distribuídas durante o período chuvoso.

4.3. Recomendação de fertilização de primeiro ano

A partir do primeiro ano da cultura, o Sistema estima a quantidade de fertilizantes seguindo as etapas do fluxograma (Figura 1). Assim, a quantidade de N e de K é estimada em função da variação (Δ) de produção de biomassa vegetativa (BV) do primeiro para o segundo ano. Para os demais nutrientes (P, Ca, Mg, S e micronutrientes), o Sistema considera que as quantidades aplicadas na cova de plantio sejam suficientes para atender a demanda da planta nessa fase.

4.3.1. Estimativa da produção de biomassa

Para lavoura com um ano de idade e população de 5.000 plantas ha^{-1} , o incremento de produção de matéria seca da cultura até o segundo ano é calculado pela diferença entre as produções de biomassa estimadas pelas equações 1 e 2 (Quadro 3):

$$\begin{aligned}\text{Produção de BV no segundo ano} &= 1,2657 + 2,9377 (5.000) - 0,0002 (5.000)^2 \\ &= 9.689,77 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de matéria seca}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Produção de BV no primeiro ano} &= 0,536 \times 5.000 \text{ plantas ha} = 2.680,00 \text{ kg ha}^{-1} \\ &\text{de matéria seca}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta \text{ de BV do 1}^\circ \text{ para o 2}^\circ \text{ ano} &= 9.689,77 - 2.680,00 = 7.009,77 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de} \\ &\text{matéria seca}\end{aligned}$$

Esta é a quantidade de biomassa vegetativa total a ser produzida durante o período entre o primeiro e o segundo ano. Entretanto, devido aos diferentes teores de nutrientes nas diversas partes da planta, é necessária a estimativa da biomassa nesses compartimentos (Quadro 13).

Quadro 13 - Biomassa de cada parte da planta de café arábica var. Catuaí, produzida durante o período entre o primeiro e o segundo ano

Parte da planta	Proporção da biomassa total ⁽¹⁾	Biomassa do compartimento
	%	kg ha ⁻¹
Folha	45	3.154,40
Galho	18	1.261,76
Caule	18	1.261,76
Raiz	19	1.331,86
Total	100	7.009,77

^{1/} Dados citados no Quadro 4.

4.3.2. Estimativa do conteúdo de nutrientes

Para a estimativa do conteúdo de nutrientes em cada parte da planta, é necessário o conhecimento do teor de cada um desses compartimentos (Quadro 14).

Quadro 14 - Conteúdo de nitrogênio e de potássio na biomassa de cada parte da planta de café arábica var. Catuaí, produzida durante um ano (primeiro para segundo ano)

Parte da planta	N ⁽¹⁾	K ^{1/}
Folha	113,56	74,13
Galho	17,29	15,90
Caule	15,39	15,65
Raiz	19,58	13,85
Total	165,82	119,52

⁽¹⁾ Com base nos teores citados no item 3.4 e na produção de matéria seca do Quadro 13.

4.3.3. Recuperação de nutrientes pela planta

A eficiência de recuperação de N é estimada pela Eq. 21 e a de K pela Eq. 23 (Quadro 8). Supondo-se uma população de 5.000 plantas ha⁻¹:

$$N = 47,778 + 0,0022 (5.000 \text{ plantas ha}^{-1}) = 58,79 \%$$

$$K = 50,778 + 0,0022 (5.000 \text{ plantas ha}^{-1}) = 61,78 \%$$

4.3.4. Quantidade de nutrientes requerida pela cultura

A quantidade de nutrientes no solo requerida pela cultura é obtida pela divisão do conteúdo de nutriente da planta por sua eficiência de recuperação:

$$\text{Exigência de N no solo} = 165,82 / 0,5879 = 282,05 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de N}$$

$$\text{Exigência de K no solo} = 119,52 / 0,6178 = 193,46 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de K}$$

4.3.5. Estimativa do suprimento de nutrientes do solo

a) Suprimento de N

Supondo um solo com 1% de matéria orgânica e t = 24 semanas (Eq. 31), a quantidade de N mineralizável = $[2.000.000 \times ((1/100)/20) \times 0,0148] e^{0,042 (24)} = 40,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de N}$.

Entretanto, nem toda a área de um hectare é explorada pelo Sistema radicular do cafeeiro. Para lavoura com idade de um ano e população de 5.000 plantas ha⁻¹, somente 30% do volume de solo de um hectare é explorado pelas raízes (Quadro 10). Assim:

Suprimento de N pelo solo = $40,6 \times 0,30 = 12,18 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de N}$ (quantidade de N acessível à planta).

b) Suprimento de K

Para a estimativa do suprimento de K do solo, primeiramente o Sistema calcula a quantidade disponível do nutriente no volume de solo explorado pelo Sistema radicular do cafeeiro. Supondo um solo com teor de K de 30 mg dm^{-3} pelo Mehlich-1:

$$\text{Quantidade disponível de K} = 30 / 0,7678 = 39,07 \text{ mg dm}^{-3}$$

em que

0,7678 é a taxa de recuperação de K pelo Mehlich-1 em função do K aplicado (Figura 6).

A quantidade de K no volume de solo de um hectare (0-20 cm de profundidade) = $39,07 \times 2 = 78,14 \text{ kg ha}^{-1}$.

Para lavoura com idade de um ano e população de 5.000 plantas ha^{-1} , somente 30% do volume de solo de um hectare é explorado pelas raízes (Quadro 10). Assim:

Suprimento do K pelo solo = $78,14 \times 0,30 = 23,44 \text{ kg ha}^{-1}$ de K (quantidade de K acessada pela planta).

4.3.6. Quantidade de nutrientes recomendada

A quantidade de nutrientes a ser aplicada à cultura é obtida pela diferença entre a demanda do elemento pela cultura e o suprimento do solo.

a) Quantidade recomendada de N = $282,05 - 12,18$ (suprimento) = $269,87 \text{ kg ha}^{-1}$ de N

b) Quantidade recomendada de K = $193,46 - 23,44$ (suprimento) = $170,02 \text{ kg ha}^{-1}$ de K ou $204,02 \text{ kg ha}^{-1}$ de K_2O .

4.4. Recomendação para fertilização de segundo ano

Para a adubação de segundo ano, a quantidade de nutrientes é estimada em função da variação (Δ) de produção de biomassa vegetativa (BV) do segundo para o terceiro ano e da produção de biomassa de frutos (estimada em função da produtividade esperada).

4.4.1. Estimativa da produção de biomassa vegetativa

Para uma lavoura com dois anos de idade e população de 5.000 plantas ha^{-1} , o incremento de produção de biomassa entre o terceiro e o segundo ano é calculado pela diferença entre a produção de biomassa estimada pelas equações 2 e 3 (Quadro 3):

$$\text{Produção de BV no terceiro ano} = 0,1888 + 4,7757 (5.000) - 0,0003 (5.000)^2 = 16.378,69 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de matéria seca}$$

$$\text{Produção de BV no segundo ano} = 1,2657 + 2,9377 (5.000) - 0,0002 (5.000)^2 = 9.689,77 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de matéria seca}$$

$$\Delta \text{ de BV do } 2^\circ \text{ para } 3^\circ \text{ ano} = 16.378,69 - 9.689,77 = 6.688,92 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de matéria seca}$$

Esta é a quantidade de biomassa vegetativa total produzida durante o período de um ano (segundo para terceiro ano). Entretanto, devido aos diferentes teores de nutrientes nas diversas partes da planta, é necessária a estimativa da biomassa nesses compartimentos (Quadro 15).

Quadro 15 - Biomassa de cada parte da planta de café arábica var. Catuaí, produzida durante o período de um ano (segundo para terceiro ano)

Parte da planta	Proporção da biomassa total ⁽¹⁾		Biomassa do compartimento kg ha ⁻¹
	%		
Folha	45		3.010,01
Galho	24		1.605,34
Caule	16		1.070,23
Raiz	15		1.003,34
Total	100		6.688,92

⁽¹⁾ Dados citados no Quadro 4.

4.4.2. Produção de biomassa de frutos

A biomassa de frutos é subdividida em biomassa de grãos (BG) e biomassa de casca (BC) e são estimadas pelas equações 8 e 9. Supondo-se uma produtividade esperada para o terceiro ano de 30 sc ha⁻¹ de café beneficiado:

$$BG = 52,8 \times 30 = 1.584,00 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de matéria seca de grãos}$$

$$BC = 42,2 \times 30 = 1.266,00 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de matéria seca de casca}$$

4.4.3. Estimativa do conteúdo de nutrientes na planta

Com os dados de biomassa em cada parte da planta e os teores de nutrientes nesses compartimentos, obtém-se o conteúdo de nutrientes acumulado durante o período considerado (Quadro 16).

Quadro 16 - Conteúdo de nutrientes na biomassa de cada parte da planta de café arábica var. Catuaí, durante um ano de crescimento (segundo para terceiro ano), supondo-se população de 5.000 plantas ha⁻¹, produtividade esperada de 30 sc ha⁻¹ e solo com PR₆₀ = 20 mg L⁻¹

Parte da planta	N	P	K	Ca	Mg	S	Zn	Cu	B
	kg ha ⁻¹								
Folha	99,33	6,32	70,74	37,62	12,64	4,51	0,048	0,036	0,196
Galho	21,99	1,77	20,23	12,84	2,89	0,80	0,026	0,032	0,040
Caule	13,06	1,07	13,27	6,42	1,71	0,43	0,004	0,016	0,015
Raiz	14,75	1,00	10,43	5,32	2,01	0,90	0,018	0,020	0,025
Grãos	38,65	3,17	31,05	3,80	4,91	1,27	0,008	0,025	0,013
Casca	22,79	2,15	41,02	5,57	2,03	1,14	0,018	0,051	0,029
Total	210,57	15,48	186,73	71,57	26,19	9,06	0,122	0,180	0,318

4.4.4. Recuperação de nutrientes pela planta

A eficiência de recuperação de nutrientes (Quadro 17) foi estimada a partir das equações citadas no Quadro 8.

Quadro 17 - Eficiência de recuperação de nutrientes pela planta de café arábica var. Catuaí, supondo-se lavoura com população de 5.000 plantas ha⁻¹ e solo com PR₆₀ = 20 mg L⁻¹

Nutriente	Eficiência de recuperação da planta
	%
N	58,79
P	29,27
K	61,78
Ca	24,22
Mg	34,00
S	24,31
Zn	3,86
Cu	17,44
B	19,17

4.4.5. Quantidade de nutriente requerida pela cultura

A quantidade de nutriente no solo exigida pela cultura é obtida pela divisão do conteúdo total do nutriente da planta por sua eficiência de recuperação (Quadro 18).

Tomando-se P como exemplo, é necessária uma quantidade de P disponível no solo de 52,88 kg ha⁻¹ para que o cafeeiro consiga absorver e alocar na sua biomassa total 15,48 kg ha⁻¹ de P, considerando uma eficiência de recuperação de P pela planta de 29,27% (Quadro 17). O mesmo cálculo é feito para os demais nutrientes.

Quadro 18 - Quantidade de nutriente no solo exigida pela cultura de café arábica var. Catuaí, durante o período de um ano (segundo para terceiro ano), para atingir a produtividade de 30 sc ha⁻¹

Nutriente	Conteúdo na planta ⁽¹⁾ / eficiência de recuperação do nutriente pela planta ⁽²⁾	Quantidade de nutriente no solo exigida pela cultura
	kg ha ⁻¹ / (kg ha ⁻¹ /kg ha ⁻¹)	kg ha ⁻¹
N	210,57 / 0,5879	358,17
P	15,48 / 0,2927	52,88
K	186,73 / 0,6178	302,25
Ca	71,57 / 0,2422	295,50
Mg	26,19 / 0,3400	77,03
S	9,06 / 0,2431	37,27
Zn	0,122 / 0,0386	3,16
Cu	0,180 / 0,1744	1,03
B	0,318 / 0,1917	1,66

⁽¹⁾ Valores citados no Quadro 16.

⁽²⁾ Valores citados no Quadro 17.

4.4.6. Estimativa do suprimento de nutrientes do solo

A quantidade disponível dos elementos no volume de solo contido em um hectare (considerando a profundidade de 0-20 cm) é estimada pela divisão do seu teor pela sua taxa de recuperação pelo extrator. Entretanto, a quantidade de nutriente requerida pela cultura é dependente do volume de solo explorado pelo Sistema radicular do cafeeiro, que por sua vez é variável com a idade e com a população de planta (Quadro 19).

Quadro 19 - Suprimento de nutrientes do solo em função do seu teor de nutrientes e do volume de solo explorado pelo Sistema radicular do cafeeiro arábica var. Catuaí, com dois anos de idade e população de 5.000 plantas ha⁻¹

Nutriente	Extrator	Teor no solo ⁽¹⁾	Taxa de recuperação pelo extrator	Conteúdo no solo	Percentual do volume de solo explorado pelas raízes	Suprimento pelo solo
		mg dm ⁻³	%	kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹
N	-	-	-	40,60	70	28,42
P	Mehlich-1	2	23,6 ⁽²⁾	16,95	70	11,86
K	KCl	30	76,8	78,12	70	54,69
Ca	KCl	40 (0,2 cmol _c dm ⁻³)	76,6	104,44	70	73,11
Mg	KCl	12 (0,1 cmol _c dm ⁻³)	80,0	30,00	70	21,00
S	Ca(H ₂ PO ₄) ₂	0,8	15,4 ⁽²⁾	10,39	70	7,27
Zn	Mehlich-1	0,05	36,1 ⁽²⁾	0,277	70	0,194
Cu	Mehlich-1	0,07	60,0	0,233	70	0,163
B	Água quente	0,03	44,8	0,134	70	0,094

⁽¹⁾ Valores hipotéticos.

⁽²⁾ Considerando PR₆₀ = 20 mg L⁻¹.

⁽³⁾ Supondo-se solo com 1% de matéria orgânica e t = 24 semanas (Eq. 31), a quantidade de N mineralizável = 40,6 kg ha⁻¹ de N.

Tomando-se como exemplo o P, um solo cuja análise indique um teor de 2 mg dm^{-3} de P pelo Mehlich-1 apresenta quantidade disponível de $16,95 \text{ kg ha}^{-1}$ de P, uma vez que a taxa de recuperação de P pelo Mehlich-1 é de 23,6% ($2/0,236 = 8,47 \text{ mg dm}^{-3} \times 2 = 16,95 \text{ kg ha}^{-1}$ de P). No entanto, as raízes do cafeeiro com dois anos de idade e população de $5.000 \text{ plantas ha}^{-1}$ explora somente 70% do volume de solo contido em 1 hectare, o que equivale a dizer que a quantidade de P acessada pela planta é 70% da quantidade total de P do solo ($16,95 \times 0,7 = 11,86 \text{ kg ha}^{-1}$ de P). A mesma seqüência de cálculos é realizada para os demais nutrientes.

4.4.7. Quantidade de nutrientes a ser recomendada pelo Sistema

A quantidade de nutrientes a ser aplicada à cultura é obtida pela diferença entre sua exigência pela cultura e o suprimento pelo solo (Quadro 20).

Quadro 20 - Quantidade de nutrientes a ser aplicada à lavoura de café arábica var. Catuaí, com dois anos de idade e população de $5.000 \text{ plantas ha}^{-1}$, para atingir produtividade de 30 sc ha^{-1}

Nutriente	Quantidade requerida pela cultura ⁽¹⁾	Suprimento do solo ⁽²⁾	Quantidade a aplicar
N	358,17	28,42	329,75
P	52,88	11,86	41,02
K	302,25	54,69	247,56
Ca	295,50	73,11	222,39
Mg	77,03	21,03	56,00
S	37,27	7,27	30,00
Zn	3,16	0,194	2,97
Cu	1,03	0,163	0,87
B	1,66	0,094	1,57

⁽¹⁾ Valores citados no Quadro 18.

⁽²⁾ Valores citados no Quadro 19.

4.5. Recomendação de fertilizantes para lavoura com idade superior a dois anos

A quantidade de nutrientes estimada para atender o requerimento de lavouras com idade superior a dois anos segue a mesma sistemática citada anteriormente (fertilização de segundo ano). Para lavouras adultas (idade superior a sete anos), considera-se que haja certa estabilização da produção de biomassa vegetativa, apenas com crescimento de novos galhos produtivos. Por essa razão, considera-se uma produção de biomassa vegetativa anual referente a 15% da estimativa de biomassa vegetativa para lavoura com sete anos (Eq. 7, Quadro 3) e na produção de biomassa de frutos, estimada em função da produtividade esperada.

Para uma lavoura adulta com 5.000 plantas ha⁻¹, produtividade de 50 sc ha⁻¹ e solo com características iguais às apresentadas no Quadro 18, o Sistema estima a quantidade de nutrientes citada no Quadro 21.

Quadro 21 - Quantidade de nutrientes a ser aplicada à lavoura de café arábica var. Catuaí, com sete anos de idade e população de 5.000 plantas ha⁻¹, para atingir produtividade de 50 sc ha⁻¹

Nutriente	Quantidade requerida pela cultura ⁽¹⁾	kg ha ⁻¹	
		Suprimento do solo ⁽²⁾	Quantidade a aplicar
N	380,91	40,60	340,31
P	59,98	16,95	43,03
K	343,24	78,12	265,12
Ca	297,04	104,44	192,60
Mg	82,36	30,00	52,36
S	37,64	10,39	27,25
Zn	3,350	0,277	3,07
Cu	1,400	0,233	1,17
B	1,480	0,134	1,35

⁽¹⁾ Considerando-se 100% do volume de solo de 1 ha (0-20 cm) explorado pelo Sistema radicular (Quadro 10).

4.6. Estimativa da quantidade de calcário

A tolerância do cafeeiro ao Al ainda é assunto polêmico, embora alguns trabalhos apresentem dados de crescimento radicular em solos com elevado teor deste elemento, como comentado inicialmente. Sendo esse fato verdadeiro, é de se supor que a resposta do cafeeiro à calagem deva ser atribuída, principalmente, ao fornecimento de Ca e Mg. Neste caso, a quantidade de calcário a ser aplicada é menor que aquela recomendada pelos métodos atualmente empregados, pouco influenciando o pH ou a saturação por bases do solo. No entanto, existem outros fatores benéficos ao crescimento/desenvolvimento da planta que são favorecidos quando se eleva o pH e a CTC do solo, como a atividade microbiana, aumentando a mineralização da matéria orgânica e a retenção de nutrientes pelo solo.

4.6.1. Estimativa da quantidade de calcário com base na demanda de Ca e Mg pelo cafeeiro

Este método estima a quantidade de calcário para o cafeeiro a partir do segundo ano de idade. Considera-se que até esta fase a quantidade de Ca e Mg aplicada no plantio satisfaz a demanda da planta.

A quantidade de Ca e Mg que a cultura demanda é estimada conforme seqüência de cálculos demonstrada anteriormente para lavoura com dois anos (Quadro 20) e adulta (Quadro 21).

Considerando-se como exemplo a quantidade de Ca e Mg estimada para lavoura adulta com 5.000 plantas ha^{-1} e produtividade potencial de 50 sc ha^{-1} (Quadro 21): 192,60 kg ha^{-1} de Ca e 52,36 de Mg; pela relação Ca:Mg, supõe-se que o calcário deva ser dolomítico (38% de CaO e 12% de MgO, por exemplo). A quantidade de calcário calculada para atender a demanda de Ca igual a 709,58 kg ha^{-1} de calcário e para atender a demanda de Mg é igual a 52,36 kg ha^{-1} . Neste caso, o Sistema recomenda a maior dose: 741,77 kg ha^{-1} .

A quantidade de calcário a ser aplicada por planta é igual a 148 g por planta (741,77 x 1.000/5.000 planta).

4.6.2. Estimativa da quantidade de calcário com base na elevação da saturação por bases

Este método visa elevar a saturação por bases do solo a 60%, quando inferior a 50%.

Supondo-se um solo com $T = 9 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, $V_1 = 30\%$ e calcário com PRNT = 90%:

$$NC = \frac{9(60-30)}{100} \therefore NC = 2,7 \text{ t ha}^{-1}$$

Em lavouras já implantadas, onde não há condição de incorporação do calcário, o Sistema estima a quantidade de calcário (QC) pela fórmula:

$$QC = NC \frac{SC}{100} \cdot \frac{PF}{20} \cdot \frac{100}{PRNT}$$

em que para uma superfície de terreno a ser coberta pela calagem (SC) = 80% e profundidade de incorporação (PF) = 5 cm:

$$QC = 2,7 \cdot \frac{80}{100} \cdot \frac{5}{20} \cdot \frac{100}{90} \therefore QC = 0,6 \text{ t ha}^{-1}$$

4.6.3. Estimativa da quantidade de calcário com base na neutralização do Al e elevação dos teores de Ca e Mg

Supondo-se um solo com $PR_{60} = 20 \text{ mg L}^{-1}$ ($Y = 1,94$), $Al^{3+} = 1,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, $Ca^{2+} + Mg^{2+} = 0,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e CTC efetiva = $1,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$:

$$\begin{aligned}
\text{NC (t ha}^{-1}\text{)} &= Y [\text{Al}^{3+} - (m_t \cdot t/100)] + [X - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})] \\
&= 1,94 [1 - (25 \cdot 1,5/100)] + [3,5 - 0,3] \\
&= 4,41 \text{ t ha}^{-1}
\end{aligned}$$

$$QC = 4,41 \cdot \frac{80}{100} \cdot \frac{5}{20} \cdot \frac{100}{90} \therefore QC = 0,98 \text{ t ha}^{-1}$$

4.7. Suprimento de nutrientes oriundos de resíduos da poda

Parte da quantidade de nutrientes imobilizada na biomassa vegetativa do cafeeiro é disponibilizada para as plantas após a poda, sendo esta disponibilização proporcional à taxa de mineralização dos diferentes compartimentos da planta podados.

Em razão da dificuldade de estimativa da quantidade de biomassa incorporada pelos diversos tipos de poda do cafeeiro, o Sistema utiliza como referência a estimativa de produção de biomassa para lavouras adultas com idade igual ou superior a sete anos (Eq. 7, Quadro 3). Portanto, para uma lavoura com população de 5.000 plantas ha⁻¹:

$$\begin{aligned}
\text{Biomassa vegetativa aos sete anos (kg ha}^{-1}\text{)} &= \\
&= 0,1678 + 12,582 (5.000) - 0,0006 (5.000)^2 = \\
&= 47.910,17 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de matéria seca}
\end{aligned}$$

Essa biomassa permite a estimativa da quantidade de nutrientes liberados, considerando-se os diferentes tipos de poda.

4.7.1. Recepa

A biomassa vegetativa incorporada pela recepa é calculada como igual a 70% da estimativa de biomassa vegetativa aos sete anos.

$$\text{Biomassa vegetativa oriunda da recepa} = 47.910,17 \times 0,70 = 33.537,12 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de matéria seca.}$$

4.7.2. Esqueletamento

a) Poda de um lado: o Sistema considera uma incorporação de biomassa referente a 20% de folhas e 15% de galhos.

Biomassa de folhas = $9.582,03 \text{ kg ha}^{-1}$ de matéria seca ($47.910,17 \times 0,20$)

Biomassa de galhos = $7.186,82 \text{ kg ha}^{-1}$ de matéria seca ($47.910,17 \times 0,15$)

b) Poda dos dois lados: o Sistema considera uma incorporação de biomassa referente a 40% de folhas e 30% de galhos.

Biomassa de folhas = $19.164,07 \text{ kg ha}^{-1}$ de matéria seca ($47.910,17 \times 0,40$)

Biomassa de galhos = $14.373,05 \text{ kg ha}^{-1}$ de matéria seca ($47.910,17 \times 0,30$)

4.7.3. Decote

a) Poda de 1/3 da planta: o Sistema considera uma incorporação de biomassa referente a 15% de galhos e 10% de caule.

Biomassa de galhos = $47.910,17 \times 0,15 = 7.186,82 \text{ kg ha}^{-1}$ de matéria seca

Biomassa de caule = $47.910,17 \times 0,10 = 4.791,02 \text{ kg ha}^{-1}$ de matéria seca

b) Poda de 2/3 da planta: o Sistema considera uma incorporação de biomassa referente a 30% de galhos e 20% de caule.

Biomassa de galhos = $47.910,17 \times 0,30 = 14.373,05 \text{ kg ha}^{-1}$ de matéria seca

Biomassa de caule = $47.910,17 \times 0,20 = 9.582,03 \text{ kg ha}^{-1}$ de matéria seca

Após a estimativa da biomassa incorporada para os diferentes tipos de poda, o Sistema calcula a biomassa mineralizada de cada compartimento do cafeeiro (Quadro 22).

Quadro 22 - Biomassa mineralizada de cada compartimento da planta de café arábica var. Catuaí em função do tipo de poda e do período após a poda

Tipo de poda	Compartimento da planta	Biomassa Total	Biomassa mineralizada ⁽¹⁾			
			1° ano	2° ano	3° ano	4° ano
			kg ha ⁻¹			
Recepa	Folha	1.676,86	1.676,86			
	Galho	6.707,42	5.365,94	1.341,48		
	Caule	12.073,36	1.207,34	2.414,67	3.622,01	4.829,34
	Raiz	3.018,34	1.509,17	905,50	603,67	
Esqueletamento 1 lado	Folha	9.582,03	9.582,03			
	Galho	7.186,82	5.749,46	1.437,36		
Esqueletamento 2 lados	Folha	19.164,07	19.164,07			
	Galho	14.373,05	11.498,44	2.874,61		
Decote 1/3	Galho	7.186,82	5.749,46	1.437,36		
	Caule	4.791,02	479,10	958,20	1.437,31	1.916,41
Decote 2/3	Galho	14.373,05	11.498,44	2.874,61		
	Caule	9.582,03	958,20	1.916,41	2.874,61	3.832,81

⁽¹⁾ Com base nas taxas de mineralização do Quadro 4.

Com o valor da biomassa mineralizada, o Sistema determina a quantidade de nutrientes que estará disponível às plantas (Quadro 23), a cada ano, abatendo esta quantidade do total a ser aplicado à cultura.

Quadro 23 - Quantidade de nutrientes disponibilizados nas diferentes épocas após a recepa para cada compartimento da planta de café arábica var. Catuaí

Compartimento	Nutriente	Quantidade de nutriente disponibilizada pela recepa			
		1º ano	2º ano	3º ano	4º ano
		kg ha ⁻¹			
Folha	N	50,31			
	P	2,88			
	K	39,40			
	Ca	20,96			
	Mg	7,04			
	S	2,46			
Galho	N	73,51	18,38		
	P	5,90	1,48		
	K	67,61	16,90		
	Ca	72,93	10,73		
	Mg	9,66	2,41		
	S	2,68	0,67		
Caule	N	14,73	29,46	44,19	58,92
	P	1,21	2,41	3,62	4,83
	K	14,97	29,94	44,91	59,88
	Ca	7,24	14,49	21,73	28,98
	Mg	1,93	3,86	5,79	7,73
	S	0,48	0,97	1,45	1,93
Raiz	N	22,18	13,31	8,87	
	P	1,51	0,91	0,60	
	K	15,69	9,42	6,28	
	Ca	8,00	5,00	3,20	
	Mg	3,02	1,81	1,21	
	S	1,35	0,81	0,54	

4.8. Suprimento de nutrientes oriundos de casca de frutos de café

É prática comum entre os produtores retornar à lavoura a casca dos frutos de café (palha). Além dos benefícios proporcionados por ser fonte de matéria orgânica, ela contém quantidades significativas de nutrientes, principalmente de K. Por essa razão, ao ser informado da quantidade de casca de frutos de café retornada à lavoura, o Sistema estima seu conteúdo de nutrientes, abatendo esta quantidade do total a ser aplicado à cultura.

4.9. Teor mínimo de nutriente no solo para sustentabilidade da produção

O Sistema permite ao usuário a escolha do teor de nutriente que deverá ser mantido no solo após a colheita, suficiente para proporcionar uma produtividade desejada na próxima safra (Quadro 24). Caso não seja fornecida essa informação, o Sistema não considera a manutenção de teor mínimo de nutrientes.

Quadro 24 - Teor mínimo do nutriente no solo necessário após a colheita de uma lavoura com 5.000 plantas ha⁻¹, suficiente para proporcionar uma produtividade desejada na próxima safra

Produtividade	Teor do elemento no solo								
	P ⁽¹⁾ (Mehlich-1)	P ⁽¹⁾ (Resina)	K (Mehlich-1)	Ca (KCl)	Mg (KCl)	S ⁽¹⁾ (Ca (H ₂ PO ₄) ₂)	Zn ⁽¹⁾ (Mehlich-1)	Cu (Mehlich-1)	B (Água quente)
sc ha ⁻¹	mg dm ⁻³			cmolc dm ⁻³		mg dm ⁻³			
10	4,17	4,45	80,2	0,29	0,14	1,93	0,45	0,13	0,18
20	4,90	5,23	95,2	0,31	0,16	2,17	0,49	0,15	0,19
30	5,63	6,01	110,2	0,32	0,18	2,41	0,53	0,17	0,20
40	6,36	6,78	125,2	0,34	0,19	2,66	0,57	0,19	0,21
50	7,09	7,56	140,1	0,23	0,21	2,90	0,60	0,21	0,22
60	7,82	8,34	155,1	0,37	0,23	3,14	0,64	0,24	0,23
70	8,55	9,12	170,1	0,38	0,25	3,38	0,68	0,26	0,24
80	9,29	9,90	185,0	0,40	0,26	3,63	0,72	0,28	0,25
90	10,02	10,68	200,0	0,41	0,28	3,87	0,76	0,30	0,27
100	10,75	11,46	215,0	0,43	0,30	4,11	0,80	0,32	0,27

⁽¹⁾ Considerando-se solo com PR₆₀ = 20 mg L⁻¹.

4.10. Análise de sensibilidade

As doses de N estimadas apresentam maior variação quando se varia a produtividade, em razão da maior demanda deste elemento pelos frutos (Figura 12). A população de plantas pouco influencia a dose de N, devido ao efeito de compensação, isto é, com o aumento da população de plantas, há substancial aumento da demanda de P para produção de biomassa vegetativa; portanto, os valores das doses de N deveriam elevar-se. Entretanto, com o aumento da população, há aumento da capacidade de recuperação de N pelas plantas, em razão da maior capacidade de exploração do solo (maior densidade de raízes). Assim, os efeitos tendem a anular-se. O teor de matéria orgânica do solo é o outro fator que mais influencia as doses de N, por causa da sua contribuição no suprimento deste elemento para as plantas.

O teor de P “disponível” no solo (Mehlich-1) e a produtividade foram as variáveis que apresentaram maior influência sobre a dose de P (Figura 13). A dose de P para a manutenção de uma dada produtividade (sustentabilidade) apresenta influência intermediária, e a população de plantas e o PR_{60} pouco influenciam a dose de P. A pouca sensibilidade da população é explicada pelo efeito de compensação entre as variáveis envolvidas. O mesmo fato ocorre com o PR_{60} , pois, à medida que o solo torna-se mais arenoso (valores mais elevados de PR_{60}), para um teor de P disponível constante, o seu conteúdo de P reduz, devido ao aumento da taxa de recuperação pelo extrator. Dessa forma, a dose de P deveria aumentar. No entanto, em solos mais arenosos, a eficiência de recuperação de P pela planta aumenta, tendendo, assim, a compensar a menor disponibilidade de P.

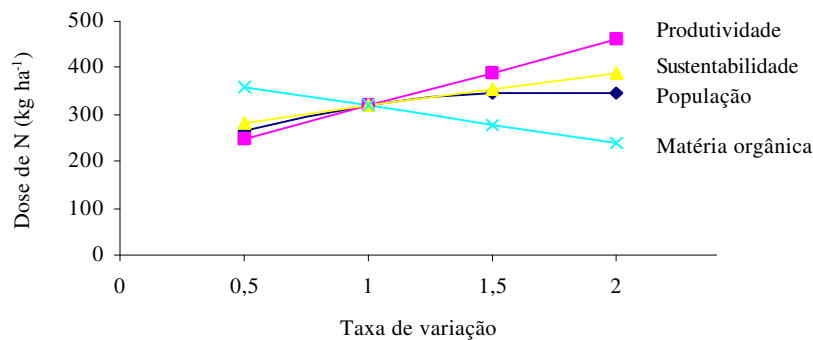


Figura 12 - Análise de sensibilidade para a alteração de 0,5 a 2,0 vezes os valores das variáveis, utilizadas na estimativa da dose de N a ser aplicada à lavoura de café arábica var. Catuaí.

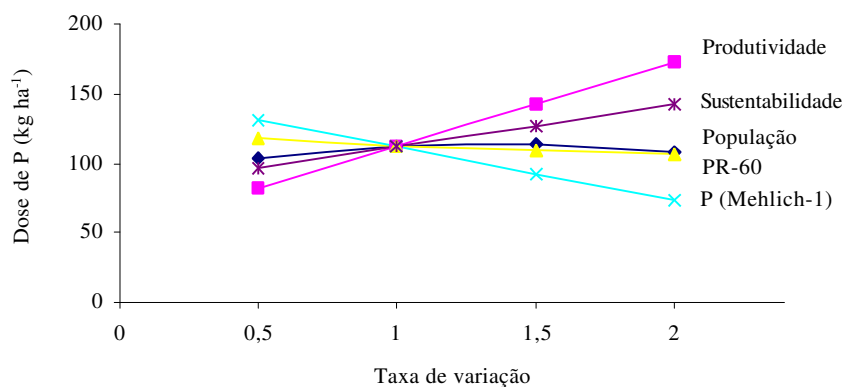


Figura 13 - Análise de sensibilidade para a alteração de 0,5 a 2,0 vezes os valores das variáveis, utilizadas na estimativa da dose de P a ser aplicada à lavoura de café arábica var. Catuaí.

Assim como o P, as doses dos demais nutrientes (Figuras 14, 15, 16, 17, 18, 19 e 20) são mais influenciadas pela produtividade e pelo teor “disponível” do elemento no solo.

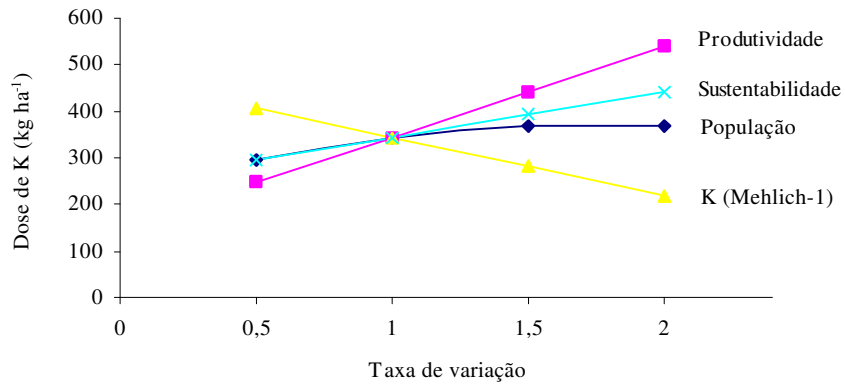


Figura 14 - Análise de sensibilidade para a alteração de 0,5 a 2,0 vezes os valores das variáveis, utilizadas na estimativa da dose de K a ser aplicada à lavoura de café arábica var. Catuaí.

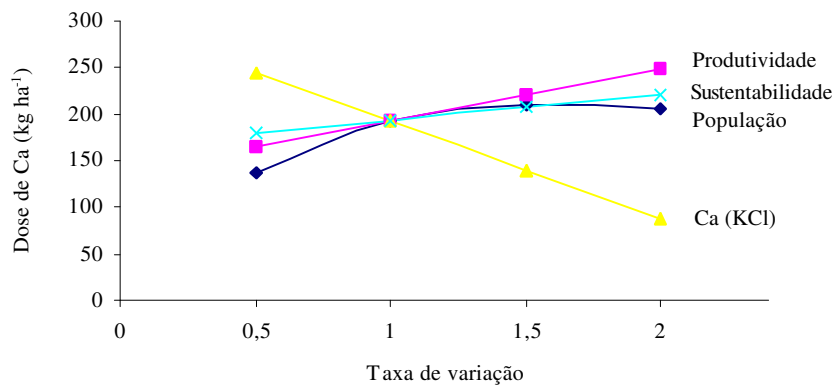


Figura 15 - Análise de sensibilidade para a alteração de 0,5 a 2,0 vezes os valores das variáveis, utilizadas na estimativa da dose de Ca a ser aplicada à lavoura de café arábica var. Catuaí.

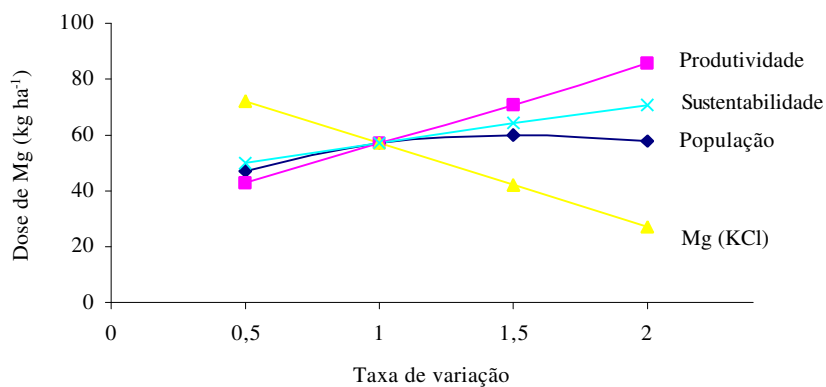


Figura 16 - Análise de sensibilidade para a alteração de 0,5 a 2,0 vezes os valores das variáveis, utilizadas na estimativa da dose de Mg a ser aplicada à lavoura de café arábica var. Catuaí.

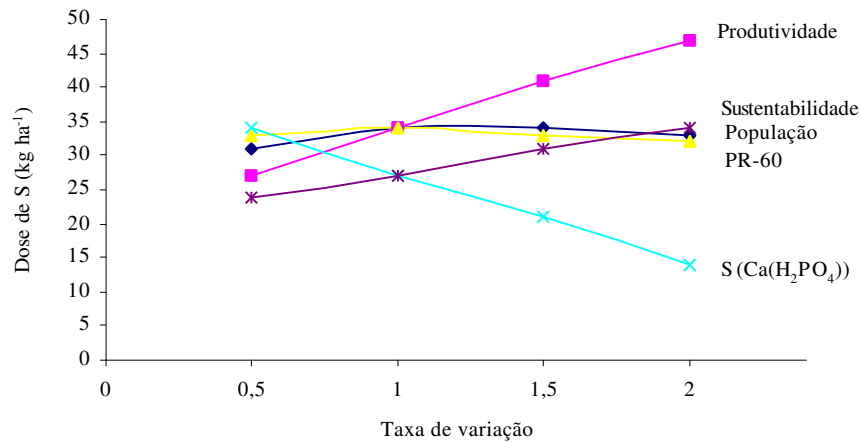


Figura 17 - Análise de sensibilidade para a alteração de 0,5 a 2,0 vezes os valores das variáveis, utilizadas na estimativa da dose de S a ser aplicada à lavoura de café arábica var. Catuaí.

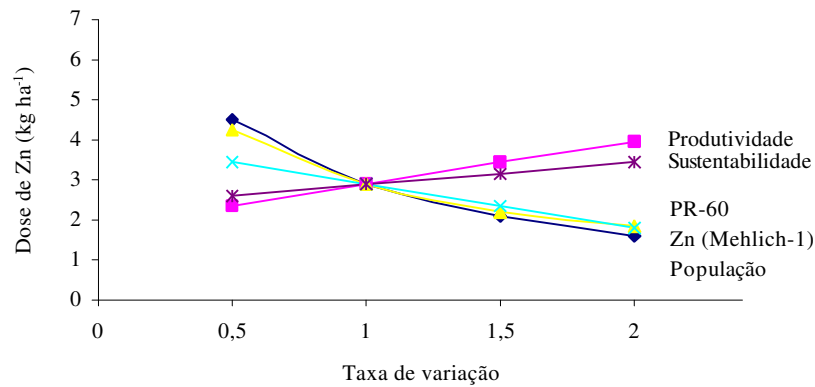


Figura 18 - Análise de sensibilidade para a alteração de 0,5 a 2,0 vezes os valores das variáveis, utilizadas na estimativa da dose de Zn a ser aplicada à lavoura de café arábica var. Catuaí.

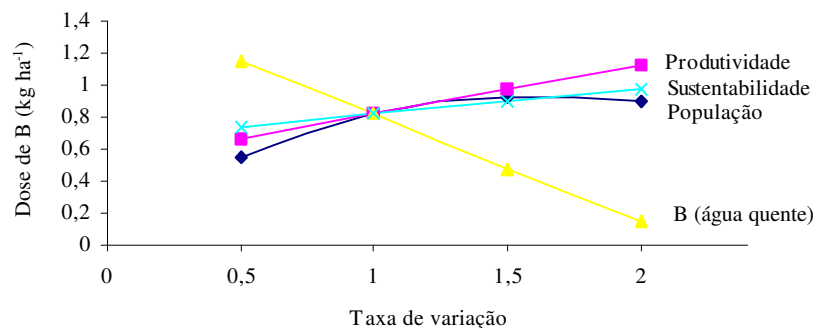


Figura 19 - Análise de sensibilidade para a alteração de 0,5 a 2,0 vezes os valores das variáveis, utilizadas na estimativa da dose de B a ser aplicada à lavoura de café arábica var. Catuaí.

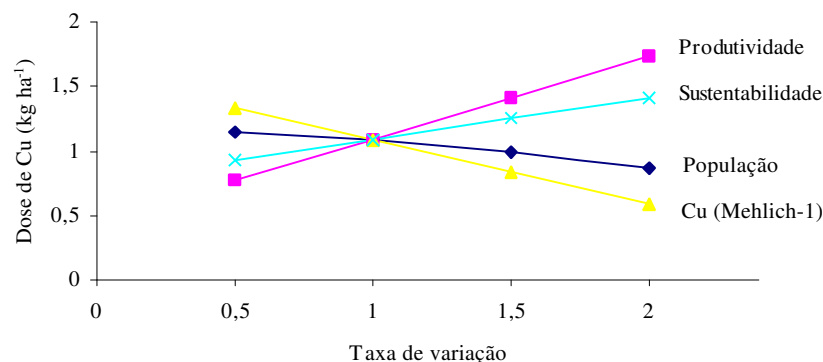


Figura 20 - Análise de sensibilidade para a alteração de 0,5 a 2,0 vezes os valores das variáveis, utilizadas na estimativa da dose de Cu a ser aplicada à lavoura de café arábica var. Catuaí.

4.11. Equações múltiplas de estimativa de dose de nutrientes

O ajuste de equações de regressão múltiplas, para todos os nutrientes, permite resumir todas as etapas de cálculos do Sistema. Com isso, por meio da utilização de gráficos cartesianos, é possível condensar as principais informações em pequenos cartões. Este Sistema foi desenvolvido por NOVAIS e SMYTH (1999) e tem por objetivo facilitar a recomendação de fertilizantes e corretivos, considerando-se as variáveis de maior importância. Para isso, foram elaborados os Quadros 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33 e 34, com as doses estimadas de cada elemento, simulando-se situações em que cada variável, isoladamente, assume diferentes valores, mantendo-se as demais constantes.

Quadro 25 - Dose de nitrogênio recomendada e eficiência de sua recuperação pela planta de café arábica var. Catuaí em função de população de plantas, produtividade, sustentabilidade e teor de matéria orgânica do solo

População	Produtividade	Sustentabilidade	MO	Dose de N	Efic. Planta
pl ha ⁻¹	sc ha ⁻¹		dag kg ⁻¹	kg ha ⁻¹	%
1.000	50	0	2	225	50
2.000	50	0	2	226	52
4.000	50	0	2	282	57
6.000	50	0	2	311	61
8.000	50	0	2	317	65
10.000	50	0	2	304	70
5.000	10	0	2	160	59
5.000	20	0	2	195	59
5.000	40	0	2	265	59
5.000	60	0	2	335	59
5.000	80	0	2	404	59
5.000	100	0	2	474	59
5.000	50	0	2	300	59
5.000	50	10	2	335	59
5.000	50	20	2	369	59
5.000	50	30	2	404	59
5.000	50	40	2	439	59
5.000	50	50	2	474	59
5.000	50	0	0,5	361	59
5.000	50	0	1,0	340	59
5.000	50	0	2,0	300	59
5.000	50	0	4,0	219	59
5.000	50	0	6,0	138	59
5.000	50	0	8,0	56	59
5.000	50	0	9,4	0	59

Quadro 26 - Dose de fósforo recomendada, eficiência de sua recuperação pela planta e nível crítico de P no solo em função de população de plantas, produtividade, P remanescente (PR₆₀), P pelo Mehlich-1 e sustentabilidade da produção de café arábica var. Catuaí

População	Produtividade	Sustentabilidade	PR ₆₀	P (Mehlich-1)	Dose de P	Efic. Planta	NiCri de P no solo (Mehlich-1)
pl ha ⁻¹	sc ha ⁻¹		mg L ⁻¹	mg dm ⁻³	kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅	%	mg dm ⁻³
1.000	50	0	20	2	95	22	11,73
2.000	50	0	20	2	85	24	6,39
4.000	50	0	20	2	97	27	6,98
6.000	50	0	20	2	99	31	7,11
8.000	50	0	20	2	96	34	6,93
10.000	50	0	20	2	88	38	6,50
5.000	10	0	20	2	42	29	4,17
5.000	20	0	20	2	56	29	4,90
5.000	40	0	20	2	85	29	6,36
5.000	60	0	20	2	113	29	7,82
5.000	80	0	20	2	142	29	9,29
5.000	100	0	20	2	170	29	10,75
5.000	50	0	20	2	99	29	6,98
5.000	50	10	20	2	113	29	11,19
5.000	50	20	20	2	127	29	11,89
5.000	50	30	20	2	142	29	12,62
5.000	50	40	20	2	156	29	13,35
5.000	50	50	20	2	170	29	14,08
5.000	50	0	5	2	109	23	5,96
5.000	50	0	10	2	103	25	6,02
5.000	50	0	20	2	99	29	7,09
5.000	50	0	30	2	98	33	9,14
5.000	50	0	40	2	97	37	11,94
5.000	50	0	50	2	94	41	15,38
5.000	50	0	20	0	138	29	7,09
5.000	50	0	20	1	119	29	7,09
5.000	50	0	20	2	99	29	7,09
5.000	50	0	20	4	60	29	7,09
5.000	50	0	20	6	21	29	7,09
5.000	50	0	20	7,09	0	29	7,09

Quadro 27 - Dose de fósforo recomendada, eficiência de sua recuperação pela planta e nível crítico de P no solo em função de população de plantas, produtividade, P remanescente (PR₆₀), P pela resina e sustentabilidade da produção de café arábica var. Catuaí

População	Produtividade	Sustentabilidade	PR ₆₀	P (Resina)	Dose de P	Efic. Planta	NiCri de P no solo (Resina)
pl ha ⁻¹	sc ha ⁻¹		mg L ⁻¹	mg dm ⁻³	kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅	%	mg dm ⁻³
1.000	50	0	20	2	96	23	12,51
2.000	50	0	20	2	88	24	6,82
4.000	50	0	20	2	99	28	7,44
6.000	50	0	20	2	102	31	7,59
8.000	50	0	20	2	98	34	7,39
10.000	50	0	20	2	90	38	6,94
5.000	10	0	20	2	45	29	4,45
5.000	20	0	20	2	59	29	5,23
5.000	40	0	20	2	87	29	6,78
5.000	60	0	20	2	116	29	8,34
5.000	80	0	20	2	144	29	9,90
5.000	100	0	20	2	173	29	11,46
5.000	50	0	20	2	101	29	7,56
5.000	50	10	20	2	110	29	7,56
5.000	50	20	20	2	118	29	7,56
5.000	50	30	20	2	127	29	7,56
5.000	50	40	20	2	136	29	7,56
5.000	50	50	20	2	144	29	7,56
5.000	50	0	5	2	118	23	7,18
5.000	50	0	10	2	112	25	7,31
5.000	50	0	20	2	101	29	7,56
5.000	50	0	30	2	94	33	7,82
5.000	50	0	40	2	87	37	8,07
5.000	50	0	50	2	82	41	8,32
5.000	50	0	20	0	138	29	7,56
5.000	50	0	20	1	120	29	7,56
5.000	50	0	20	2	101	29	7,56
5.000	50	0	20	4	65	29	7,56
5.000	50	0	20	6	29	29	7,56
5.000	50	0	20	7,56	0	29	7,56

Quadro 28 - Dose de potássio recomendada, eficiência de sua recuperação pela planta e nível crítico de K no solo em função de população de plantas, produtividade, K pelo Mehlich-1 e sustentabilidade da produção de café arábica var. Catuaí

População	Produtividade	Sustentabilidade	K (Mehlich-1)	Dose de K	Efic. Planta	NiCri de K no solo (Resina)
pl ha ⁻¹	sc ha ⁻¹		mg dm ⁻³	kg ha ⁻¹ de K ₂	%	mg dm ⁻³
1.000	50	0	30	285	53	213
2.000	50	0	30	276	55	119
4.000	50	0	30	328	60	135
6.000	50	0	30	353	64	143
8.000	50	0	30	356	68	144
10.000	50	0	30	342	73	140
5.000	10	0	30	157	62	80
5.000	20	0	30	203	62	95
5.000	40	0	30	297	62	125
5.000	60	0	30	390	62	155
5.000	80	0	30	483	62	185
5.000	100	0	30	577	62	215
5.000	50	0	30	343	62	140
5.000	50	10	30	390	62	150
5.000	50	20	30	437	62	160
5.000	50	30	30	483	62	170
5.000	50	40	30	530	62	180
5.000	50	50	30	577	62	190
5.000	50	0	0	437	62	140
5.000	50	0	20	374	62	140
5.000	50	0	40	312	62	140
5.000	50	0	80	187	62	140
5.000	50	0	120	63	62	140
5.000	50	0	140,1	0	62	140

Quadro 29 - Dose de cálcio recomendada, eficiência de sua recuperação pela planta e nível crítico de Ca no solo em função de população de plantas, produtividade, cálcio pelo KCl e sustentabilidade da produção de café arábica var. Catuai

População	Produtividade	Sustentabilidade	Ca (KCl)	Dose de Ca	Efic. Planta	NiCri de Ca no solo (Resina)
pl ha ⁻¹	sc ha ⁻¹		cmol _c dm ⁻³	kg ha ⁻¹ de Ca	%	mg dm ⁻³
1.000	50	0	0,20	122	17	0,67
2.000	50	0	0,20	121	19	0,43
4.000	50	0	0,20	179	22	0,54
6.000	50	0	0,20	199	26	0,58
8.000	50	0	0,20	195	30	0,57
10.000	50	0	0,20	176	33	0,54
5.000	10	0	0,20	141	24	0,47
5.000	20	0	0,20	154	24	0,49
5.000	40	0	0,20	180	24	0,54
5.000	60	0	0,20	205	24	0,59
5.000	80	0	0,20	231	24	0,64
5.000	100	0	0,20	257	24	0,69
5.000	50	0	0,20	193	24	0,57
5.000	50	10	0,20	205	24	0,59
5.000	50	20	0,20	218	24	0,62
5.000	50	30	0,20	231	24	0,64
5.000	50	40	0,20	244	24	0,67
5.000	50	50	0,20	257	24	0,69
5.000	50	0	0	297	24	0,57
5.000	50	0	0,10	245	24	0,57
5.000	50	0	0,20	193	24	0,57
5.000	50	0	0,30	140	24	0,57
5.000	50	0	0,40	88	24	0,57
5.000	50	0	0,50	36	24	0,57
5.000	50	0	0,57	0	24	0,57

Quadro 30 - Dose de magnésio recomendada, eficiência de sua recuperação pela planta e nível crítico de Mg no solo em função de população de plantas, produtividade, Mg pelo KCl e sustentabilidade da produção de café arábica var. Catuaí

População	Produtividade	Sustentabilidade	Mg (KCl)	Dose de Mg	Efic. Planta	NiCri de Mg no solo (Resina)
pl ha ⁻¹	sc ha ⁻¹		cmol _c dm ⁻³	kg ha ⁻¹ de Mg	%	cmol _c dm ⁻³
1.000	50	0	0,10	45	26	0,40
2.000	50	0	0,10	39	28	0,23
4.000	50	0	0,10	50	32	0,27
6.000	50	0	0,10	53	36	0,28
8.000	50	0	0,10	52	40	0,27
10.000	50	0	0,10	48	44	0,26
5.000	10	0	0,10	25	34	0,18
5.000	20	0	0,10	32	34	0,21
5.000	40	0	0,10	46	34	0,25
5.000	60	0	0,10	59	34	0,30
5.000	80	0	0,10	73	34	0,34
5.000	100	0	0,10	86	34	0,39
5.000	50	0	0,10	52	34	0,27
5.000	50	10	0,10	59	34	0,30
5.000	50	20	0,10	66	34	0,32
5.000	50	30	0,10	73	34	0,34
5.000	50	40	0,10	80	34	0,36
5.000	50	50	0,10	86	34	0,39
5.000	50	0	0	82	34	0,27
5.000	50	0	0,05	67	34	0,27
5.000	50	0	0,10	52	34	0,27
5.000	50	0	0,15	37	34	0,27
5.000	50	0	0,20	22	34	0,27
5.000	50	0	0,27	0	34	0,27

Quadro 31 - Dose de enxofre recomendada, eficiência de sua recuperação pela planta e nível crítico de S no solo em função de população de plantas, produtividade, PR₆₀, S pelo Ca(H₂PO₄) e sustentabilidade da produção de café arábica var. Catuaí

População	Produtividade	Sustentabilidade	PR ₆₀	S (Ca(H ₂ PO ₄))	Dose de S	Efic. Planta	NiCri de S no solo
pl ha ⁻¹	sc ha ⁻¹		mg L ⁻¹	mg dm ⁻³	kg ha ⁻¹	%	mg dm ⁻³
1.000	50	0	20	0,6	26	17	4,56
2.000	50	0	20	0,6	25	19	2,56
4.000	50	0	20	0,6	29	23	2,85
6.000	50	0	20	0,6	30	26	2,90
8.000	50	0	20	0,6	29	29	2,81
10.000	50	0	20	0,6	26	33	2,61
5.000	10	0	20	0,6	17	24	1,93
5.000	20	0	20	0,6	20	24	2,17
5.000	40	0	20	0,6	27	24	2,66
5.000	60	0	20	0,6	33	24	3,14
5.000	80	0	20	0,6	39	24	3,63
5.000	100	0	20	0,6	46	24	4,11
5.000	50	0	20	0,6	30	24	2,90
5.000	50	10	20	0,6	33	24	3,14
5.000	50	20	20	0,6	36	24	3,38
5.000	50	30	20	0,6	39	24	3,63
5.000	50	40	20	0,6	42	24	3,87
5.000	50	50	20	0,6	46	24	4,11
5.000	50	0	5	0,6	24	21	1,43
5.000	50	0	10	0,6	28	22	1,95
5.000	50	0	20	0,6	30	24	2,90
5.000	50	0	30	0,6	30	26	3,74
5.000	50	0	40	0,6	29	28	4,50
5.000	50	0	50	0,6	28	31	5,20
5.000	50	0	20	0	38	24	2,90
5.000	50	0	20	0,5	31	24	2,90
5.000	50	0	20	1,0	25	24	2,90
5.000	50	0	20	2,0	12	24	2,90
5.000	50	0	20	2,9	0	24	2,90

Quadro 32 - Dose de zinco recomendada, eficiência de sua recuperação pela planta e nível crítico de Zn no solo em função de população de plantas, produtividade, PR₆₀, Zn pelo Mehlich-1 e sustentabilidade da produção de café arábica var. Catuaí

População	Produtividade	Sustentabilidade	PR ₆₀	Zn (Mehlich-1)	Dose de Zn	Efic. Planta	NiCri de Zn no solo
pl ha ⁻¹	sc ha ⁻¹		mg L ⁻¹	mg dm ⁻³	kg ha ⁻¹	%	mg dm ⁻³
1.000	50	0	20	0,2	6,62	0,9	2,59
2.000	50	0	20	0,2	4,01	1,6	0,92
4.000	50	0	20	0,2	2,62	3,1	0,67
6.000	50	0	20	0,2	1,94	4,6	0,55
8.000	50	0	20	0,2	1,44	6,1	0,46
10.000	50	0	20	0,2	1,03	7,6	0,39
5.000	10	0	20	0,2	1,37	3,9	0,45
5.000	20	0	20	0,2	1,59	3,9	0,49
5.000	40	0	20	0,2	2,02	3,9	0,57
5.000	60	0	20	0,2	2,46	3,9	0,64
5.000	80	0	20	0,2	2,90	3,9	0,72
5.000	100	0	20	0,2	3,33	3,9	0,80
5.000	50	0	20	0,2	2,24	3,9	0,60
5.000	50	10	20	0,2	2,46	3,9	0,64
5.000	50	20	20	0,2	2,68	3,9	0,68
5.000	50	30	20	0,2	2,90	3,9	0,72
5.000	50	40	20	0,2	3,11	3,9	0,76
5.000	50	50	20	0,2	3,33	3,9	0,80
5.000	50	0	5	0,2	3,71	2,5	0,85
5.000	50	0	10	0,2	3,05	3,0	0,73
5.000	50	0	20	0,2	2,24	3,9	0,60
5.000	50	0	30	0,2	1,81	4,7	0,56
5.000	50	0	40	0,2	1,57	5,6	0,50
5.000	50	0	50	0,2	1,44	6,5	0,44
5.000	50	0	20	0	3,35	3,9	0,60
5.000	50	0	20	0,1	2,79	3,9	0,60
5.000	50	0	20	0,2	2,24	3,9	0,60
5.000	50	0	20	0,4	1,13	3,9	0,60
5.000	50	0	20	0,6	0	3,9	0,60

Quadro 33 - Dose de boro recomendada, eficiência de sua recuperação pela planta e nível crítico de B no solo em função de população de plantas, produtividade, B pela água quente e sustentabilidade da produção de café arábica var. Catuaí

População	Produtividade	Sustentabilidade	B (água quente)	Dose de B	Efic. Planta	NiCri de B no solo
pl ha ⁻¹	sc ha ⁻¹		mg dm ⁻³	kg ha ⁻¹	%	mg dm ⁻³
1.000	50	0	0,1	0,66	14	0,40
2.000	50	0	0,1	0,68	15	0,25
4.000	50	0	0,1	0,96	18	0,32
6.000	50	0	0,1	1,07	20	0,34
8.000	50	0	0,1	1,06	23	0,34
10.000	50	0	0,1	0,97	26	0,32
5.000	10	0	0,1	0,75	19	0,27
5.000	20	0	0,1	0,82	19	0,28
5.000	40	0	0,1	0,96	19	0,32
5.000	60	0	0,1	1,11	19	0,35
5.000	80	0	0,1	1,25	19	0,38
5.000	100	0	0,1	1,40	19	0,41
5.000	50	0	0,1	1,04	19	0,33
5.000	50	10	0,1	1,11	19	0,35
5.000	50	20	0,1	1,18	19	0,36
5.000	50	30	0,1	1,25	19	0,38
5.000	50	40	0,1	1,33	19	0,40
5.000	50	50	0,1	1,40	19	0,41
5.000	50	0	0	1,48	19	0,33
5.000	50	0	0,10	1,04	19	0,33
5.000	50	0	0,15	0,81	19	0,33
5.000	50	0	0,20	0,59	19	0,33
5.000	50	0	0,30	0,14	19	0,33
5.000	50	0	0,33	0	19	0,33

Quadro 34 - Dose de cobre recomendada, eficiência de sua recuperação pela planta e nível crítico de Cu no solo em função de população de plantas, produtividade, Cu pelo Mehlich-1 e sustentabilidade da produção de café arábica var. Catuaí

População	Produtividade	Sustentabilidade	Cu (Mehlich-1)	Dose de Cu	Efic. Planta	NiCri de Cu no solo
pl ha ⁻¹	sc ha ⁻¹		mg dm ⁻³	kg ha ⁻¹	%	mg dm ⁻³
1.000	50	0	0,1	1,25	11	0,85
2.000	50	0	0,1	1,11	13	0,43
4.000	50	0	0,1	1,10	16	0,43
6.000	50	0	0,1	1,03	19	0,41
8.000	50	0	0,1	0,93	22	0,38
10.000	50	0	0,1	0,80	25	0,34
5.000	10	0	0,1	0,49	17	0,25
5.000	20	0	0,1	0,63	17	0,29
5.000	40	0	0,1	0,92	17	0,38
5.000	60	0	0,1	1,22	17	0,46
5.000	80	0	0,1	1,51	17	0,55
5.000	100	0	0,1	1,80	17	0,64
5.000	50	0	0,1	1,07	17	0,42
5.000	50	10	0,1	1,22	17	0,46
5.000	50	20	0,1	1,36	17	0,51
5.000	50	30	0,1	1,51	17	0,55
5.000	50	40	0,1	1,65	17	0,60
5.000	50	50	0,1	1,80	17	0,64
5.000	50	0	0	1,40	17	0,42
5.000	50	0	0,1	1,07	17	0,42
5.000	50	0	0,2	0,74	17	0,42
5.000	50	0	0,3	0,40	17	0,42
5.000	50	0	0,42	0	17	0,42

A partir do valores contidos nos Quadros 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33 e 34, foram ajustadas regressões múltiplas de estimativa da dose de cada nutriente (Quadro 35).

Quadro 35 - Equações de regressão múltipla de estimativa da dose de nutrientes para a cultura do café arábica var. Catuaí, para diferentes condições

Equação ⁽¹⁾	R ²
Dose N = 144,081 + 0,0103** Pop + 3,467** Prod - 39,380** MO + 3,964** Sust	0,987**
Dose P = 78,576 + 1,427** Prod - 0,949** PR + 0,0129** PR ² - 19,259** P _{Meh.1} + 4,460** Sust	0,993**
Dose P = 89,508 + 1,425** Prod - 1,523** PR + 0,0134** PR ² - 17,968** P _{Resina} + 0,897** Sust	0,991**
Dose de K = 103,858 + 0,0295** Pop - 0,00000195** Pop ² + 4,668** Prod - 3,111** K + 4,687** Sust	0,998**
Dose de Ca = 116,895 + 0,0282** Pop - 0,00000261** Pop ² + 1,287** Prod - 520,195** Ca + 1,303** Sust	0,996**
Dose de Mg = 32,318 + 0,00507** Pop - 0,000000386** Pop ² + 0,679** Prod - 299,374** Mg + 0,691** Sust	0,995**
Dose S = 14,358 + 0,321** Prod + 0,458** PR - 0,0724** PR ² - 12,607** S _{Ca(H2PO4)} + 0,333** Sust	0,980**
Dose Zn = 6,219 + 0,000528** Pop + 0,0213** Prod - 0,0473** PR + 5,912** Zn _{Meh.1} + 0,0143** Sust	0,823**
Dose de B = 0,849 + 0,0000405** Pop + 0,00730** Prod - 4,288** B + 0,00857** Sust	0,953**
Dose de Cu = 0,880 + 0,0000438** Pop + 0,0146** Prod - 3,311** Cu + 0,0148** Sust	0,997**

⁽¹⁾ Dose do nutriente = kg ha⁻¹. Pop = população de plantas (plantas ha⁻¹). Prod = produtividade (sc ha⁻¹). MO = teor de matéria orgânica do solo (%). PR = PR₆₀ (mg L⁻¹). P, K, S, Zn, B e Cu = teor disponível do elemento no solo (mg dm⁻³). Ca, Mg = teor disponível do elemento no solo (cmol_c dm⁻³). Sust. = sustentabilidade de uma produtividade desejada (sc ha⁻¹). Extratores dos micronutrientes: Zn e Cu: Mehlich-1 e B: Água quente.

4.12. Comparação entre recomendações

Objetivando comparar as recomendações de nutrientes para a cova de plantio e cobertura inicial, elaborou-se o Quadro 36, considerando-se a implantação de uma lavoura de café arábica var. Catuaí em covas de 64 dm³ e solo com as seguintes características químicas: P = 5 mg dm⁻³, K = 30 mg dm⁻³, zero de micronutrientes, PR₆₀ = 20 mg L⁻¹ e necessidade de calagem = 5 t ha⁻¹.

Quadro 36 - Recomendações de adubação para cova e cobertura inicial do café arábica var. Catuaí estimadas pelo Sistema e pela recomendação dos estados de Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo e Paraná

Estado	Cova de plantio						Cobertura	
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Zn	B	Calcário	N	K ₂ O
	g							
MG	-	80	-	1,0-2,0	0,6-1,0	160	12	30
ES	-	40	-	2,0	0,5	200	12	25
SP	-	60	30	2,0	1,0	400	16	-
PR	-	40	25	-	-	300	16	-
Sistema	6	80	8	0,3	0,06	160	12	17

Fonte: CFSEMG (1999), São Paulo (RAIJ, 1985), Espírito Santo (PREZOTTI, 1992) e Paraná (LIMA et al., 1994).

As doses de 25 e 30 g de K₂O para aplicação total na cova de plantio recomendadas nos estados de São Paulo e Paraná podem elevar a concentração de K do solo a aproximadamente 325 e 390 mg dm⁻³, respectivamente. Essas concentrações podem causar danos à muda, em razão do seu elevado poder de salinização do solo, principalmente em lavouras não irrigadas. Por essa razão, o Sistema recomenda o fracionamento da dose de 25 g cova⁻¹ de K₂O: 1/3 na cova, 1/3 após o pegamento da muda e 1/3 após 30 dias. O mesmo parcelamento é utilizado para o N, em que a dose de 18 g cova⁻¹ é fracionada em três parcelas de 6 g cova⁻¹.

As doses de 1 a 2 g cova⁻¹ de Zn (5 a 10 g cova⁻¹ de sulfato de zinco) e 0,6 a 1 g cova⁻¹ de B (5,5 a 9,1 g cova⁻¹ de bórax) recomendadas pelas tabelas parecem ser excessivas. Esses valores equivalem a níveis críticos que variam de 5,6 a 11,2 mg dm⁻³ de Zn (Mehlich-1) e 3,5 a 7 mg dm⁻³ de B (água quente). FREITAS (1998) determinou níveis críticos para o crescimento e desenvolvimento de mudas de café arábica

var. Catuaí de 1,44 mg dm⁻³ de Zn (Mehlich-1 e solo com PR₆₀ = 20 mg L⁻¹) e 0,4 mg dm⁻³ de B (água quente).

Objetivando comparar as recomendações de adubação para lavoura em produção nos estados maiores produtores de café do País, elaborou-se o Quadro 37.

Observam-se variações das doses de nutrientes recomendadas nos estados maiores produtores de café, sendo elas variações, provavelmente, atribuídas às diferentes características regionais. As doses determinadas pelo Sistema para essa comparação foram estimadas utilizando-se valores médios das variáveis (fator capacidade dos solos estimado pelo PR₆₀, teor do elemento “disponível”, produtividade e população de plantas). Em situações em que uma ou mais dessas variáveis se distancia da média de maior ocorrência, o Sistema apresenta maior sensibilidade, isto é, as recomendações variam de maneira contínua, aproximando-se mais da realidade, ao passo que as tabelas não apresentam essa flexibilidade. Por essa razão, o Sistema apresenta aplicação mais universal, ou seja, estima doses de nutrientes com maior precisão para diferentes situações.

Quadro 37 - Recomendações de N, P e K para a cultura do café arábica var. Catuaí estimadas pelo Sistema e pela recomendação dos estados de Minas Gerais (CFSEMG, 1999), São Paulo (RAIJ, 1985), Espírito Santo (PREZOTTI, 1992) e Paraná (LIMA et al., 1994), considerando-se uma lavoura com 5.000 planta ha⁻¹ e produtividade de 50 sc ha⁻¹

Nutriente	MG	SP	ES	PR	Sistema
	kg ha ⁻¹				
N	400	300	330	320	340
P ₂ O ₅	70	80	110	70	97
K ₂ O	400	300	340	450	343

5. RESUMO E CONCLUSÕES

A recomendação de adubação para a cultura do café e para a maioria das culturas é baseada em tabelas elaboradas a partir de experiência de técnicos e produtores e em curvas de calibração para alguns nutrientes em locais específicos, e os resultados são extrapolados para outras regiões. Embora esse procedimento tenha contribuído para a uniformização das recomendações de adubação, suas limitações acarretam estimativas pouco exatas, podendo ocasionar gastos desnecessários de fertilizantes e desbalanço nutricional na cultura.

Por essa razão, atualmente, as pesquisas estão partindo para métodos que considerem toda e qualquer variável que possa influenciar a disponibilidade de nutrientes e sua absorção pelas plantas. Isso tem sido facilitado pela elaboração de Sistemas informatizados, constituídos por diversos modelos de estimativa de disponibilidade de nutrientes no solo, demanda de nutrientes em função da espécie e da produtividade, além da influência de fatores climáticos na nutrição das plantas. Os programas são passíveis de mudanças, permitindo a introdução de novos modelos à medida que forem aprimorados.

Assim, desenvolveu-se um Sistema para recomendação de adubação de café, o qual reúne grande volume de informações de pesquisa na área de solos e nutrição desta cultura e tem como base o cálculo do balanço nutricional da lavoura e a demanda de nutrientes para a obtenção de uma dada produtividade. Portanto, este trabalho teve como objetivo desenvolver um Sistema que estime com maior exatidão a quantidade de corretivos e fertilizantes a ser aplicada à cultura do café arábica.

Utilizando-se dados, foram ajustadas equações de estimativa de biomassa, estimativa da quantidade disponível de nutrientes do solo e seu suprimento para as plantas, estimativa da eficiência de recuperação de nutrientes pela planta e, como objetivo principal, estimativa da quantidade de nutrientes a ser aplicada à cultura.

Comparando as recomendações de adubação adotadas nos estados maiores produtores de café do País, observam-se variações das doses de nutrientes, sendo estas variações, provavelmente, atribuídas às diferentes características regionais. As doses determinadas pelo Sistema para essa comparação foram estimadas utilizando-se valores médios das variáveis (fator capacidade dos solos estimado pelo PR-60, teor do elemento “disponível”, produtividade e população de plantas). Em situações em que uma ou mais dessas variáveis se distancia da média, o Sistema apresenta maior sensibilidade, isto é, varia as recomendações de maneira contínua, aproximando-se mais da realidade, ao passo que as tabelas não apresentam esta flexibilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACCIOLY, L.J.O. Avaliação do enxofre disponível pelo método da resina trocadora de ânions. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1995. 57p. (Tese de Mestrado)
- ACOCK, B. & REYNOLDS, J.F. Introduction: modularity in plant models. *Ecol. Modell.*, 94:1-6, 1997.
- ALCOFORADO, P.A.U.G. Efetividade de diferentes materiais corretivos na correção de acidez de dois Latossolos e no crescimento do sorgo. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1992. 54p. (Tese de Mestrado)
- ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L. & BARROS, N.F. Níveis críticos de enxofre em solos de cerrado para o crescimento de mudas de eucalipto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 19., Curitiba, 1983, Resumos. Curitiba, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1983. p.164-165.
- ANDRADE, A.G.; HAAG, H.P. & OLIVEIRA, G.D. Acumulação diferencial de nutrientes por cinco cultivares de milho (*Zea mays* L.). I - Acumulação de macronutrientes. Anais. 1975. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1975. p.151-169, 1975.
- BELTRAN, R.R. Níveis de boro, cobre e zinco em solução nutritiva e em dois solos para milho. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1998. 66p. (Tese de Doutorado)

- BERTONI, J.C. Efeito do cobre na nutrição e crescimento do arroz cultivado em solos de várzea sob inundação. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 1997. 57p. (Tese de Mestrado)
- BOTERWEG, P. The user's influence on model calibration results: an example of the model SOIL, independently calibrated by two users. *Ecol. Modell.*, 81:71-81, 1995.
- BRACCINI, M.C.L.; MARTINEZ, H.E.P.; PEREIRA, P.R.G.; SAMPAIO, N.F. & PEREIRA, A.A. Tolerância de genótipos de cafeeiro ao alumínio em solução nutritiva. II Teores de P, Ca e Al e eficiência ao P e Ca. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:443-450, 1998.
- CALBO, A.G. & CAMBRAIA, J. Efeito do alumínio sobre a composição mineral de dois cultivares de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). *R. Ceres*, 27:369-378, 1980.
- CAMARGO, C.E.O. A concentração de fósforo na tolerância de cultivares de trigo à toxicidade de alumínio em soluções nutritivas. *Bragantia*, 44:49-64, 1985.
- CAMPELLO, M.R. Avaliação da reversibilidade de fósforo não-lábil para lábil em solos com diferentes características químicas, físicas e mineralógicas. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1993. 63p. (Tese de Mestrado)
- CHAVES, J.C.D. & SARRUGE, J.R. Alterações nas concentrações de macronutrientes nos frutos e folhas do cafeeiro durante um ciclo produtivo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 19:427-432, 1984.
- CLÍSTENES, W.A.N.; SOUZA JUNIOR, J.O.; MARTINEZ, H.E.P.; TEIXEIRA, P.R.G. & FONTES, P.C.R. Absorção de P e Al em cafeeiro (*Coffea arabica*) cultivado em solução nutritiva com Sistema radicular parcialmente submetido a doses de alumínio. *R. Ceres*, 44:331-338, 1997.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS - CFSEMG. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª aproximação. Viçosa, 1999. 359p.
- CORRÊA, J.B.; GARCIA, W.R. & COSTA, P.C. Extração de nutrientes pelos cafeeiros Mundo Novo e Catuaí. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA CAFEEIRA, 13., São Lourenço, 1986. Resumos. Rio de Janeiro, Instituto Brasileiro do Café, 1986. p.35-41.

- COSTA, E.B. Manual técnico para a cultura do café no estado do Espírito Santo. Vitória, Secretaria Estadual Agricultura, 1995. 163p.
- COUTO, C.; NOVAIS, R.F.; TEIXEIRA, J.L.; BARROS, N.F. & NEVES, J.C.L. Níveis críticos de zinco no solo e na planta para o crescimento de milho em amostras de solos com diferentes valores do fator capacidade. R. Bras. Ci. Solo, 16:79-87, 1992.
- DELAZARI, P.C. Disponibilidade de fósforo em solos do estado do Espírito Santo. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1979. 85p. (Tese de Mestrado)
- DIAS, L.E. Dinâmica de formas de enxofre e de cátions trocáveis em colunas de solo tratadas com diferentes doses de fósforo e de gesso. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1992. 147p. (Tese de Doutorado)
- FERNÁNDEZ ROJAS, I.E.J. Efeito do capeamento da apatita-de-araxá com alumínio sobre a disponibilidade de fósforo e o crescimento do sorgo. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1992. 44p. (Tese de Mestrado)
- FERREIRA, G.B. Interferências de matéria orgânica e ferro na dosagem de boro com azometina-h e comparação de extratores para boro disponível no solo. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1998. 97p. (Tese de Mestrado)
- FONSECA, D.M. Níveis críticos de fósforo em amostras de solos para o estabelecimento de *Andropogon gayanus*, *Brachiaria decumbens* e *Hyparrhenia rufa*. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1987. 146p. (Tese de Mestrado)
- FONSECA, D.M. Níveis críticos de fósforo para o estabelecimento de *Andropogon gayanus* var. *bisquamulatus*, *Panicum maximum* e *Brachiaria decumbens*, em casa de vegetação e no campo. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1995. 150p. (Tese de Doutorado)
- FONTES, M.P.F.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & BORGES, A.C. Disponibilidade do enxofre em três extratores químicos em Latossolos de Minas Gerais. R. Bras. Ci. Solo, 6:226-230, 1982.
- FREIRE, F.M. Disponibilidade de fósforo e de enxofre para a cultura do milho em três solos de Minas Gerais. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1996. 114p. (Tese de Doutorado)

- FREITAS, J.A.D. Determinação da necessidade de calagem para o crescimento inicial do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1998. 99p. (Tese de Doutorado)
- GALLO, J.R.; BATAGLIA, O.C. & MORAES, F.R.P. Teores de nitrogênio em folhas de cafeeiro em relação à adubação química. *Bragantia*, 30:169-178, 1971.
- GALRÃO, E.Z. Níveis críticos de zinco para o milho cultivado em Latossolo Vermelho-Amarelo, fase cerrado. *R. Bras. Ci. Solo*, 19:225-260, 1995.
- GARCIA PEÑA, J.A. Cálcio, magnésio e potássio no solo e em plantas de algodão, utilizando magnesita calcinada e cloreto de potássio, em três níveis de calagem. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1991. 79p. (Tese de Mestrado)
- GARCIA, A.W.R. Retirada de nutrientes pela produção de cafeeiro – cultivares Mundo Novo, Catuaí e Catimor. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA CAFEEIRA, 8., Campos do Jordão, 1995. Resumos. Rio de Janeiro, Instituto Brasileiro do Café, 1980. p.3-6.
- GIMENEZ, S.M.N.; CHAVES, J.C.D.; PAVAN, M.A. & CRUCES, I.I. Toxicidade de cobre em mudas de cafeeiro. *R. Bras. Ci. Solo*, 16:361-366, 1992.
- GONÇALVES, J.L.M. Cinética de transformação de fósforo lábil em não-lábil em amostras de solos de cerrado. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1988. 62p. (Tese de Mestrado)
- GUSS, A. Exigência de fósforo para estabelecimentos de gramíneas e leguminosas forrageiras tropicais em solos com diferentes características físicas e químicas. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1988. 74p. (Tese de Mestrado)
- JARRELL, W.M. & BEVERLY, R.B. The dilution effect in plant nutrition studies. *Adv. Agron.*, 34:197-224, 1981.
- KIRKMAN, J.H.; BASKER, A.; SURAPANENI, A. & MacGREGOR, A.N. Potassium in the soils of New Zeland - a review. *N.Z.J. Agric. Res.*, 37:207-227, 1994.

- LIMA, E.; COSTA, A.; PARRA, M.S. & PAVAN, M.A. Recomendação para as principais culturas do estado do Paraná. In: Paraná, SEAB. Manual técnico do subprojeto de manejo e conservação do solo. 2.ed Curitiba, 1994. 372p.
- LIMA, P.C. Dependência da seringueira às micorrizas visiculo-arbuscular, em função de doses de fósforo, zinco e cobre adicionados em um Latossolo Vermelho-Amarelo. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1991. 109p. (Tese de Mestrado)
- LONDOÑO, M.E.A. & VALENCIA, A.G. Toxicidade de alumínio em plantas de café. *Cenicafé*, 34:61-67, 1983.
- LOUZADA, P.T.C. Eficiência de uma escória de siderurgia como corretivo e fertilizante do solo. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1987. 52p. (Tese de Mestrado)
- MAESTRI, M. & BARROS, R.S. Coffee. In: ALVIM, P.T. & KOZLOWSKI, T.T., eds. *Ecophysiology of tropical crops*. New York, Academic Press, 1977. p.249-78.
- MARTIN, H.W. & SPARKS, D.L. On the behavior of nonexchangeable potassium in soil. *Comm. Soil Sci. Plant. Anal.*, 16:133-162, 1985.
- MELLO, J.W.V. Dinâmica de fósforo, ferro e manganês e disponibilidade de fósforo para arroz em solos inundados. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1991. 198p. (Tese de Doutorado)
- MELO, V.F. Potássio e magnésio em minerais de solos e relação entre propriedades da caulinita com formas não-trocáveis destes nutrientes. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1998. 205p. (Tese de Doutorado)
- MENDONÇA, E.S. The Effects of the organic and mineral fractions on the acidity and charge of soils from the Cerrado Region, Brazil. RU, Reading University, 1992. 230p. (Tese de Doutorado)
- MENEZES, A.A. Disponibilidade de zinco, para milho, pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3 e DTPA. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1998. 52p. (Tese de Doutorado)
- MONTEITH, J.L. The quest for balance in crop modeling. *Agron. J.*, 88:695-697, 1996.

- MORAES, F.R.P. & CATANI, R.A. A absorção de elementos minerais pelo fruto do cafeeiro durante sua formação. *Bragantia*, 23:331-6, 1964.
- MORAIS, E.R.C. Formas de potássio em solos do Estado de Minas Gerais e sua disponibilidade para plantas de milho. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 85p. (Tese de Mestrado)
- MOREIRA, J.F. Cinética de transformação de P-lábil em não-lábil no solo avaliada por análise química e crescimento de mudas de eucalipto. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1988. 52p. (Tese de Mestrado)
- MOURA FILHO, G. Disponibilidade de fósforo em amostras de solos de várzeas. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1990. 76p. (Tese de Mestrado)
- NOVAIS, R.F. & SMYTH, T.J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.
- NOVELINO, J.O. Disponibilidade de fósforo ao longo do tempo em solos altamente intemperizados avaliada por extratores químicos e crescimento vegetal. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 70p. (Tese de Doutorado)
- NUTMAN, F.J. The root system of *Coffea arabica* L. II The effect of some soil conditions in modifying the “normal” root system. *Emp. J. Experim. Agric.*, 1:285-296, 1933.
- OLIVEIRA, F.H.T. Disponibilidade de fósforo pela resina aniônica e difusão de alumínio em Latossolos. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1998. 45p. (Tese de Mestrado)
- 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*, 12:225-229, 1988.
- PASSIOURA, J.B. Simulation models: science, snake oil, education, or engineering. *Agron. J.*, 88:690-694, 1996.
- PAVAN, M.A. & BIRGHAM, F.T. Toxicity of aluminium to coffee seedlings grown in nutrient solution. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 46:993-997, 1982.

- PAVAN, M.A.; CHAVES, J.C.D. & ANDROCIOLI FILHO, A. Produção de café em função da densidade de plantio, adubação e tratamento fitossanitário. Turrialba, 44:227-231, 1994.
- PHILIP, J.R. Soils, natural science, and models. Soil Sci., 151:91-98, 1991.
- PIRES, A.M.M. Disponibilidade de zinco e cobre adicionados a solos via lodo de esgoto para plantas de arroz. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1998. 55p. (Tese de Mestrado)
- PORTELA, M.C.L.S. Necessidade de calagem para as culturas do feijão e milho, em consórcio, em solos da microrregião Mata de Viçosa, Minas Gerais. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1984. 68p. (Tese de Mestrado)
- PREZOTTI, L.C. & BRAGANÇA, C.M. Recomendação de adubação para a cultura do café. In: COSTA, E.B., eds. Manual técnico para a cultura do café no estado do Espírito Santo. Vitória, Secretaria Estadual de Agricultura, 1995. 163p.
- PREZOTTI, L.C. Nível crítico de potássio para a produção de mudas de eucalipto. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1985. 45p. (Tese de Mestrado)
- PREZOTTI, L.C. Recomendação de calagem e adubação para o estado do Espírito Santo (3º aproximação). Vitória, ES: EMCAPA, 1992. 73p. (Circular Técnica, 12)
- RAIJ, B. VAN. Recomendação de adubação e calagem para o estado de São Paulo. Instituto Agrônomo de Campinas, 1985. 107p. (Boletim Técnico, 100)
- REYNOLDS, J.F. & ACOCK, B. Modularity and genericness in plant and ecosystem models. Ecol. Modell., 94:7-16, 1997.
- REYNOLDS, J.F. & ACOCK, B. Predicting the response of plants to on creasing carbon dioxide: A critique of plant growth models. Ecol. Modell., 29:107-129, 1985.
- RIBEIRO A.C. & SARABIA, W.A.T. Avaliação de extratores para zinco e boro disponíveis em Latossolo do Triângulo mineiro. R. Bras. Ci. Solo, 8:85-89, 1984.

- RIVAS YUPANQUI, F.F. Nutrição fosfatada e fotossíntese no Sistema simbiótico *Medicago sativa* - *Rizobium meliloti* em solos com diferentes disponibilidades de fósforo. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1997. 124p. (Tese de Doutorado)
- RODRIGUES, E.C.O. Efeito da aplicação de sulfato de cálcio e de uma mistura de carbonatos de cálcio e magnésio sobre características químicas do solo e o crescimento de plantas de milho. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1993 103p. (Tese de Mestrado)
- RODRIGUES, L.A. Crescimento e composição mineral na parte aérea e nas raízes de duas variedades de café em resposta à calagem na subsuperfície do solo. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1997. 89p. (Tese de Mestrado)
- ROLIM, M.V. Fósforo disponível pelos extratores Mehlich-1, Resina em esfera e lâmina, em amostras de solos submetidos a diferentes graus de moagem. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1998 70p. (Tese de Mestrado)
- SANTINATO, R.; BARROS, U.V.; MATIELLO, J.B. & BARBOSA, C.M. Adubação de micronutrientes Zn, B, Cu, Fe, Mn, Co e Mo no plantio de café em solo LVH. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA CAFEEIRA, 8., Poços de Caldas, 1998. Resumos. Rio de Janeiro, Instituto Brasileiro do Café, 1998. p.105-106.
- SANZ-SCOVINO, J.I.; WEIL, S. & JONES, A.A. The mineralogy and potassium reserves of a soil from Carimagua, Colombia. *Geoderma*. 52:291-302, 1992.
- SILVA, D.J. Necessidade de calagem e diferentes relações Ca:Mg para a produção de mudas de eucalipto. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1986. 53p. (Tese de Mestrado)
- SILVA, J.T.A. Relações entre características do solo que refletem a capacidade-tampão de fósforo e o nível crítico para sorgo em dez Latossolos de Minas Gerais, em casa de vegetação. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1990. 85p. (Tese de Mestrado)
- SINCLAIR, T.R. & SELIGMAN, N.G. Crop modeling: from infancy to maturity. *Agron. J.*, 88:698-704, 1996.

- SMETHURST, P.J. & COMERFORD, N.B. Simulating nutrient uptake by single or competing and contrasting root systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:1361-1367, 1993.
- SNOECK, J. & JADIN, P. Calculation method to study mineral fertilization of coffee trees based on soil analyses. *Café Cacao*, 34:17-21, 1990.
- SOUZA, R.B. Níveis críticos de enxofre em solos e em folhas de cultivares de café. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 88p. (Tese de Doutorado)
- STANFORD, G.S. & SMITH, S.J. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 36:465-472, 1972.
- TIMLIN, D.J. & PACHEPSKY, Y.A. A modular soil and root process simulator. *Ecol. Modell.*, 94:67-80, 1997.
- TOMÉ JUNIOR, J.B. & NOVAIS, R.F. Utilização de modelos como alternativa às tabelas de recomendação de adubação. *Bol. Inf. SBCS*, 25:8-11, 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: IHSS, 1999. p.189-199.
- VIANA, A.S. Adubação N, P, K, e S para cafeeiros em recuperação após safra alta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA CAFEEIRA, 19., Três Pontas, 1993. Resumos. Rio de Janeiro, Instituto Brasileiro do Café, 1993. p.55-7.
- VIÉGAS, R.A. Dinâmica de fontes de fósforo aplicadas a solos com diferentes níveis de acidez. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1991. 66p. (Tese de Mestrado)
- VILLANI, E.M.A. Fluxo difusivo de fósforo influenciado por fontes e por tempo de contato do fósforo com o solo. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1995. 57p. (Tese de Mestrado)