

TRANSFORMAÇÃO DE TABELAS AGRONÔMICAS EM FUNÇÕES CONTÍNUAS DE SUFICIÊNCIA E DOSE PARA RECOMENDAÇÃO DIGITAL DE ADUBAÇÃO

Diego Henrique Fernandes Paiva¹; Ronaldo Pereira de Oliveira²; Guilherme Montandon Chaer³

¹ Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Seropédica-RJ. diegopaiva@ufrj.br

² Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ. ronaldo.oliveira@embrapa.br

³ Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ. guilherme.chaer@embrapa.br

RESUMO

Os sistemas tradicionais de recomendação de adubação utilizados no Brasil são baseados em tabelas agronômicas que classificam os teores de nutrientes em faixas discretas. Embora eficientes para uso convencional, tais tabelas apresentam limitações para aplicações em agricultura digital, modelagem computacional e sistemas automatizados de suporte à decisão. Este trabalho propõe uma metodologia para converter tabelas agronômicas de interpretação de análise de solo e recomendação de adubação em funções contínuas de suficiência e dose por meio da parametrização de funções sigmoidais. A abordagem foi aplicada aos critérios da Quinta Aproximação para o Uso de Corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais. Os resultados demonstram que as curvas contínuas reproduzem adequadamente os limites agronômicos tradicionais, permitindo recomendações mais flexíveis, automatizadas e compatíveis com plataformas digitais de recomendação de adubação.

PALAVRAS-CHAVE

agricultura digital; fertilidade do solo; função sigmoidal

TRANSFORMATION OF AGRONOMIC TABLES INTO CONTINUOUS SUFFICIENCY AND DOSE FUNCTIONS FOR DIGITAL FERTILIZER RECOMMENDATION.

ABSTRACT

Traditional fertilizer recommendation systems used in Brazil are based on agronomic tables that classify nutrient levels into discrete ranges. While efficient for conventional use, these tables have limitations for applications in digital agriculture, computational modeling, and automated decision support systems. This work proposes a methodology to convert agronomic tables for soil analysis interpretation and fertilizer recommendation into continuous sufficiency and dose functions through the parameterization of sigmoidal functions. The approach was applied to the criteria of the Fifth Approximation for the Use of Soil Amendments and Fertilizers in Minas Gerais. The results demonstrate that the continuous curves adequately reproduce the traditional agronomic limits, allowing for more flexible, automated recommendations compatible with digital fertilizer recommendation platforms.

KEYWORDS

digital agriculture; soil fertility; sigmoidal function

INTRODUÇÃO

A análise de solo é uma das principais ferramentas para o manejo da fertilidade e para a recomendação de corretivos e fertilizantes. No Brasil, grande parte das recomendações é baseada em tabelas de interpretação que classificam os analitos da análise de solo em categorias como muito baixo, baixo, médio, bom e muito bom. As recomendações de adubação, por sua vez, são definidas em tabelas que fixam quantidades de cada nutriente de acordo com a classe de interpretação.

Apesar de sua ampla utilização, esse modelo apresenta limitações quando aplicado a sistemas digitais. Pequenas diferenças analíticas podem provocar mudanças abruptas de classe, gerando recomendações distintas para situações muito semelhantes. Com o avanço da agricultura de precisão e da agricultura digital, surge a necessidade de métodos capazes de representar a fertilidade do solo de forma contínua.

As funções sigmoidais são amplamente utilizadas para modelar fenômenos biológicos por apresentarem comportamento gradual e assintótico (Wymore, 1993). Dessa forma, tornam-se ferramentas promissoras para representar níveis de suficiência nutricional e gerar recomendações mais consistentes em ambientes computacionais.

Fundamentação Teórica

A Quinta Aproximação para o Uso de Corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais (5ª Aproximação) constitui uma das principais referências para interpretação da fertilidade do solo no Brasil (Ribeiro et. al., 1999). O sistema utiliza faixas de interpretação derivadas de experimentos agrônômicos para orientar a recomendação de nutrientes.

Paralelamente, metodologias como DRIS (Diagnosis and Recommendation Integrated System) (Bangroo et al., 2010) e PRA (Potencial de Resposta à Adubação) (Wadt, 1996) demonstram a importância de abordagens quantitativas e integradas para avaliação nutricional. A digitalização desses conceitos exige modelos matemáticos que permitam transições contínuas entre estados de deficiência e suficiência.

Segundo Wymore (1993), sistemas complexos podem ser representados por modelos matemáticos capazes de descrever relações contínuas entre variáveis. Esse conceito fundamenta a transformação das tabelas agrônômicas em funções contínuas.

Objetivo Geral

Desenvolver uma metodologia para transformar tabelas agrônômicas em funções contínuas de suficiência e dose para aplicação em sistemas digitais de recomendação de adubação.

Objetivos específicos:

- Converter classes discretas de interpretação de analitos de análises de fertilidade do solo em curvas contínuas usando função sigmoide com limites entre zero e um;
- Ajustar equações lineares para representar níveis de suficiência de nutrientes no solo; e
- Estruturar uma base de dados quantitativos para viabilizar o uso de algoritmos preditivos baseados em ciência de dados e modelos de inteligência artificial.

MATERIAL E MÉTODOS

Fonte das tabelas agrônômicas

A metodologia foi aplicada às tabelas de interpretação de análise de solo e recomendação de corretivos e fertilizantes descritas na 5ª Aproximação para o Uso de Corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais. As tabelas foram utilizadas como fonte de referência para a obtenção dos limites críticos dos atributos químicos do solo e das doses recomendadas de nutrientes para diferentes culturas, classes de fertilidade e expectativas de produtividade.

O procedimento foi estruturado em duas etapas principais: (i) conversão das classes interpretativas da análise de solo em funções contínuas de pontuação de suficiência; e (ii) conversão das tabelas de recomendação de adubação em funções matemáticas de dose, tendo como variável independente a pontuação contínua de suficiência do nutriente no solo.

Conversão das classes interpretativas em funções contínuas de suficiência

Os limites das classes de interpretação da fertilidade do solo foram convertidos em escores contínuos de suficiência nutricional, variando de 0 a 1. Nessa escala, valores próximos de 0 indicam condição de baixa suficiência do nutriente ou atributo avaliado, enquanto valores próximos de 1 indicam condição de alta suficiência.

Para atributos em que maiores valores indicam melhor condição de fertilidade do solo, como fósforo, potássio, cálcio, magnésio, matéria orgânica, soma de bases e saturação por bases, foram utilizadas funções do tipo “mais é melhor” (Figura 1). Nesses casos, os limites das classes Muito Baixo, Baixo, Médio e Bom foram associados, respectivamente, aos escores de suficiência 0,20; 0,40; 0,60; e 0,80. Valores acima do limite da classe Bom tenderam assintoticamente a 1,00, representando condição de suficiência máxima (Tabela 1).

Para atributos em que menores valores indicam melhor condição química do solo, como alumínio trocável, saturação por alumínio e acidez potencial, foram utilizadas funções do tipo “menos é melhor” (Figura 1). Nesses casos, a escala foi invertida, de modo que valores baixos do atributo receberam pontuações altas de suficiência e valores elevados receberam pontuações baixas. Assim, as classes associadas a melhor condição química foram relacionadas a escores próximos de 1, enquanto as classes de maior restrição foram associadas a escores próximos de 0 (Tabela 1).

Para atributos com faixa ótima, como pH, foi adotada uma função do tipo “ótimo”, formada pela combinação de uma função crescente no limite inferior e uma função decrescente no limite superior (Figura 1). Dessa forma, valores intermediários, próximos à faixa considerada ideal, receberam maiores pontuações de suficiência, enquanto valores abaixo ou acima da faixa ótima receberam pontuações menores.



Figura 1. Representação esquemática das funções de pontuação de suficiência utilizadas para converter atributos químicos do solo em escala contínua entre 0 e 1. A função “mais é melhor” é aplicada a atributos cuja suficiência aumenta com o valor do analito, como P, K, Ca, Mg, matéria orgânica, soma de bases e saturação por bases. A função “menos é melhor” é aplicada a atributos cuja suficiência diminui com o aumento do analito, como Al^{3+} , m% e H+Al. A função “ótimo” é aplicada a atributos com faixa ideal intermediária, como pH. B representa o ponto médio da transição, no qual $P(B) = 0,5$; U representa o ponto de ancoragem superior da curva; e S controla a inclinação da função.

Tabela 1. Conversão das classes interpretativas da fertilidade do solo pela 5ª Aproximação em pontuações de suficiência.

Classe interpretativa	Pontuação de suficiência	
	Função “mais é melhor”	Função “menos é melhor”
Muito baixo	0,20	0,80
Baixo	0,40	0,60
Médio	0,60	0,40
Bom	0,80	0,20
Muito bom	→ 1,00	→ 0,00

Função sigmoidal de pontuação

A relação entre o valor do atributo químico do solo e sua pontuação contínua de suficiência foi descrita por uma função sigmoidal (Wymore, 1993) com a seguinte forma geral:

$$P(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{B-L}{x-L}\right)^{2S(B+x-2L)}}$$

em que $P(x)$ é a pontuação de suficiência do atributo no solo; x é o valor do atributo químico; L é o limite inferior da função; B é o ponto médio da transição, no qual $P(B) = 0,5$; e S é o parâmetro associado à inclinação da curva.

Neste estudo, adotou-se $L = 0$, de modo que a função foi simplificada para:

$$P(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{B}{x}\right)^{2S(B+x)}}$$

Essa função apresenta comportamento assintótico, permitindo representar transições graduais entre baixa e alta suficiência. Quando $S > 0$, a função é crescente, caracterizando atributos do tipo “mais é melhor”. Quando $S < 0$, a função é decrescente, caracterizando atributos do tipo “menos é melhor”.

Definição do ponto de ancoragem superior e ajuste dos parâmetros

Embora o parâmetro U não faça parte da forma estrutural da função sigmoidal, ele foi utilizado como ponto de ancoragem superior da curva. Esse ponto representa o valor do atributo no qual a pontuação de suficiência se aproxima do platô superior. Para funções crescentes, foi imposta a condição:

$$P(U) \approx 0,99$$

Essa condição foi utilizada para tornar a inclinação da curva reprodutível e evitar caudas excessivamente longas ou pouco realistas. A partir da definição de B e U , o parâmetro S foi calculado por:

$$S = \frac{\ln\left(\frac{1-p_u}{p_u}\right)}{2(B+U)\ln\left(\frac{B}{U}\right)}$$

em que p_u é a pontuação definida no ponto de ancoragem. Para curvas crescentes, adotou-se $p_u = 0,99$. Para curvas decrescentes, utilizou-se lógica análoga, adotando-se $p_u = 0,01$, o que resulta em valores negativos de S .

Os parâmetros B e U foram ajustados pelo critério de compromisso global, isto é, buscando-se o conjunto de valores que minimizasse o erro total entre as pontuações previstas pela função sigmoidal e os escores-alvo derivados das classes interpretativas das tabelas. A função-objetivo utilizada foi a soma dos erros quadráticos:

$$\sum_{i=1}^n [P(x_i) - P_i]^2$$

em que x_i representa cada limite crítico da tabela de interpretação e P_i representa a pontuação-alvo atribuída ao respectivo limite. Por padrão, foram utilizados pesos iguais para todos os pontos. A qualidade do ajuste foi avaliada pelo erro quadrático médio (RMSE) e pela comparação entre as pontuações-alvo e as pontuações estimadas pela função ajustada.

Parametrização das funções de pontuação dependentes de textura e P-rem

Para alguns analitos, a 5ª Aproximação apresenta critérios de interpretação condicionados a atributos auxiliares do solo. Esse é o caso do fósforo disponível por Mehlich-1, cuja interpretação depende do teor de argila ou, alternativamente, do fósforo remanescente (P-rem), e do enxofre disponível ($S-SO_4^{-2}$), cuja interpretação também é condicionada ao P-rem. Nesses casos, a parametrização das funções de pontuação foi realizada de forma específica para cada classe de argila ou P-rem indicada nas tabelas originais.

Inicialmente, os limites críticos de cada classe de argila ou P-rem foram convertidos em pontos-alvo de suficiência, conforme a escala adotada no estudo. Para cada condição, foram então ajustados os parâmetros (B), (S) e (U) da função sigmoidal, mantendo-se ($L=0$) e a condição de ancoragem ($P(U) \approx 0,99$). Esse procedimento resultou em um conjunto de parâmetros para cada estrato da tabela original.

Em seguida, os parâmetros obtidos foram relacionados ao valor representativo da respectiva faixa de argila ou P-rem, geralmente definido pelo ponto médio da classe. Essas relações foram descritas por funções empíricas contínuas, selecionadas conforme o comportamento observado de cada parâmetro, incluindo funções lineares, logarítmicas ou exponenciais quando apropriado. Assim, os parâmetros (B), (S) e (U) puderam ser estimados para valores intermediários de argila ou P-rem não explicitamente listados nas tabelas.

Dessa forma, a interpretação originalmente estratificada em classes foi convertida em um modelo contínuo de dupla entrada. Para uma nova amostra de solo, o teor de argila ou o valor de P-rem é utilizado para estimar os parâmetros da função sigmoidal, e o teor do nutriente é então convertido em pontuação contínua de suficiência. Esse procedimento preserva a lógica agrônômica da 5ª Aproximação, ao reconhecer o efeito da capacidade tampão do solo sobre a interpretação de P e $S-SO_4^{-2}$, ao mesmo tempo em que reduz descontinuidades entre classes e facilita a implementação computacional do modelo.

Conversão das tabelas de recomendação de adubação em funções de dose

Na segunda etapa, as tabelas de recomendação de adubação, especialmente para nitrogênio, fósforo e potássio, foram convertidas em funções matemáticas contínuas. Para isso, as doses recomendadas nas tabelas originais foram relacionadas às pontuações de suficiência obtidas na etapa anterior.

Para cada cultura, faixa de produtividade e modalidade de aplicação, como plantio ou cobertura, as doses discretas de nutrientes foram associadas às respectivas pontuações das classes interpretativas. Em seguida, ajustou-se uma função linear do tipo:

$$D = aP + b$$

em que D é a dose recomendada do nutriente, expressa em $kg\ ha^{-1}$ de N, P_2O_5 ou K_2O ; P é a pontuação contínua de suficiência do nutriente no solo; e a e b são os coeficientes da função linear.

Quando a recomendação apresentava redução da dose com o aumento da suficiência do nutriente no solo, como geralmente ocorre para fósforo e potássio, a inclinação da função foi negativa. Dessa forma, solos com baixa suficiência recebem maiores doses recomendadas, enquanto solos com alta suficiência recebem menores doses. Nos casos em que a tabela apresentava doses constantes ou critérios específicos por produtividade, a função foi ajustada respeitando a estrutura original da recomendação.

Fluxo integrado da metodologia

O procedimento resultou em um fluxo contínuo de interpretação e recomendação. Inicialmente, o resultado da análise de solo foi convertido em uma pontuação contínua de suficiência por meio da função sigmoideal ajustada. Em seguida, essa pontuação foi utilizada como variável de entrada na função linear de recomendação de dose.

Esse fluxo permitiu transformar tabelas agronômicas originalmente discretas em modelos quantitativos contínuos, mantendo a rastreabilidade em relação aos manuais de referência. A abordagem possibilita diferenciar valores intermediários dentro de uma mesma classe, reduzir saltos abruptos nas recomendações e facilitar a implementação em bancos de dados, interfaces de programação de aplicações e sistemas digitais de suporte à decisão agronômica.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas sigmoideais ajustadas apresentaram comportamento compatível com a interpretação agronômica tradicional. A substituição das classes discretas por funções contínuas permitiu reduzir descontinuidades observadas nas recomendações convencionais.

Para fósforo e potássio, observou-se que a transição entre deficiência e suficiência ocorreu de forma gradual, representando melhor a realidade biológica das culturas. Além disso, o modelo possibilitou estimar níveis intermediários de suficiência que não seriam identificados pelas tabelas convencionais.

A abordagem favorece a integração com sistemas de suporte à decisão, softwares de recomendação e plataformas de agricultura de precisão. Também abre possibilidades para integração futura com DRIS, PRA e modelos probabilísticos de resposta à adubação.

Outro benefício observado é a possibilidade de geração automática de recomendações em ambientes digitais, reduzindo subjetividades e aumentando a padronização dos processos de interpretação.

Tabela 2. Exemplo de conversão dos limites de interpretação da saturação por bases (V%) em probabilidades de suficiência.

Classe tradicional	V (%)	Escore atribuído
Muito Baixo	20	0,20
Baixo	40	0,40
Médio	60	0,60
Bom	80	0,80
Muito Bom	>80	→ 1,00

Validação da correspondência entre a interpretação contínua e a interpretação tradicional

Com o objetivo de verificar a coerência agronômica das funções sigmoideais ajustadas, os limites das classes interpretativas da 5ª Aproximação para o Estado de Minas Gerais foram utilizados como pontos de referência na construção das curvas de pontuação. Para os indicadores em que valores mais elevados representam melhor condição de fertilidade do solo (P, K, Ca, Mg, SB, CTC, matéria

orgânica e saturação por bases), as classes Muito Baixo, Baixo, Médio e Bom foram associadas, respectivamente, às pontuações 0,20, 0,40, 0,60 e 0,80. Para os indicadores em que valores menores representam melhor condição química do solo (Al^{3+} , m% e H+Al), a escala foi invertida, associando-se as mesmas classes às pontuações 0,80, 0,60, 0,40 e 0,20.

Os resultados na Tabela 3 demonstraram que as funções sigmoidais preservaram os limites agronômicos estabelecidos pela 5ª Aproximação, convertendo-os em uma escala contínua de suficiência. Dessa forma, a interpretação deixa de ocorrer por faixas discretas e passa a representar gradualmente as variações da fertilidade do solo, sem perder a coerência com o sistema tradicional de recomendação.

Tabela 3. Correspondência entre as classes interpretativas da 5ª Aproximação e as pontuações utilizadas pelo método proposto.

Classe interpretativa	Pontuação ("mais é melhor")	Pontuação ("menos é melhor")
Muito Baixo	0,20	0,80
Baixo	0,40	0,60
Médio	0,60	0,40
Bom	0,80	0,20
Muito Bom	→ 1,00	→ 0,00

Para exemplificar a correspondência entre os dois métodos, a Tabela 4 apresenta os valores de saturação por bases (V%) definidos pela 5ª Aproximação e suas respectivas pontuações calculadas pela função sigmoidal. Os limites das classes para V% são ≤ 20 (Muito Baixo), 20,1–40 (Baixo), 40,1–60 (Médio), 60,1–80 (Bom) e >80 (Muito Bom).

Tabela 4. Correspondência entre as classes de saturação por bases (V%) da 5ª Aproximação e as pontuações obtidas pela função sigmoidal.

Classe tradicional	V (%)	Pontuação calculada
Muito Baixo	20	0,20
Baixo	40	0,39
Médio	60	0,61
Bom	80	0,79
Muito Bom	>80	$>0,80$

Observa-se que os limites das classes tradicionais coincidem com os pontos de referência definidos para a curva sigmoidal, evidenciando que o método contínuo reproduz a lógica agronômica da interpretação convencional. Entretanto, diferentemente do sistema categórico, a abordagem proposta permite distinguir valores pertencentes a uma mesma classe. Por exemplo, para saturação por bases, valores de 60 e 79% são enquadrados na mesma classe pela 5ª Aproximação, mas recebem pontuações distintas (0,61 e 0,78, respectivamente), refletindo de forma mais sensível as diferenças de fertilidade do solo.

Além disso, a mesma lógica foi aplicada aos demais atributos químicos avaliados, utilizando-se os limites críticos estabelecidos pela 5ª Aproximação para fósforo, potássio, cálcio, magnésio, matéria orgânica, soma de bases, CTC, alumínio trocável e saturação por alumínio. Assim, as curvas sigmoidais ajustadas apresentaram comportamento compatível com a interpretação agronômica

tradicional, preservando os níveis críticos utilizados na recomendação de corretivos e fertilizantes, porém com a vantagem de fornecer uma representação contínua da suficiência nutricional.

CONCLUSÕES

A transformação de tabelas agronômicas em funções contínuas utilizando funções sigmoidais mostrou-se tecnicamente viável.

As curvas ajustadas reproduziram adequadamente os limites de interpretação da fertilidade do solo, permitindo representar de forma contínua o potencial de suficiência nutricional.

A metodologia apresenta elevado potencial para aplicação em sistemas digitais de recomendação de adubação, agricultura de precisão e ferramentas de suporte à decisão agrônômica.

Estudos futuros podem incorporar calibrações regionais, integração com DRIS e validação em experimentos de campo.

REFERÊNCIAS

BEAUFILS, E. R. Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS). University of Natal, 1973.

BANGROO, S. A., BHAT, M. I., ALI, T., AZIZ, M. A., BHAT, M. A., & WANI, M. A. Diagnosis and recommendation Integrated System (DRIS)-A review. International Journal of Current Research, v. 10, n. 11, p. 084-097, 2010.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação. Viçosa: CFSEMG, 1999.

WADT, P. G. S. Os métodos da chance matemática e do sistema integrado de diagnose e recomendação (DRIS) na avaliação nutricional de plantios de eucalipto. UFV, 1996.

WYMORE, A. W. Model-Based Systems Engineering: An Introduction to the Mathematical Theory of Systems Engineering. Boca Raton: CRC Press, 1993.