

APLICAÇÃO DO MÉTODO SIMPLEX PARA OTIMIZAR A ADUBAÇÃO FOLIAR NO AGRONEGÓCIO

APPLICATION OF THE SIMPLEX METHOD TO OPTIMIZE FOLIAR FERTILIZATION IN AGRIBUSINESS

APLICACIÓN DEL MÉTODO SIMPLEX PARA OPTIMIZAR LA FERTILIZACIÓN FOLIAR EN LA AGROINDUSTRIA

**Matheus Dias Barros¹, Bruno Quirino de Oliveira², Antônio Marcos de Melo Medeiros³, Felipe,
Corrêa Veloso dos Santos⁴, Luiz Alberto do Couto⁵, Marcos Lajovic Carneiro⁶**

DOI: 10.54899/dcs.v23i91.5351

Recibido: 25/04/2026 | Aceptado: 15/06/2026 | Publicación en línea: 29/06/2026.

RESUMO

O agronegócio desempenha um papel de grande relevância na economia global, especialmente no Brasil, e a nutrição foliar exerce influência direta sobre a produtividade das culturas, além de representar parcela significativa dos custos de produção. Este artigo apresenta um estudo voltado à otimização da aplicação de adubos foliares na agricultura, com ênfase na redução de custos e no atendimento às exigências nutricionais das plantas. O objetivo principal é avaliar a viabilidade da programação linear, por meio do método Simplex, como ferramenta de apoio à tomada de decisão na escolha e dosagem de fertilizantes foliares. A metodologia baseia-se na modelagem matemática do problema, na coleta de dados reais de campo e na implementação computacional de um algoritmo em linguagem Python, utilizando bibliotecas especializadas em otimização. Os resultados obtidos demonstram que a abordagem proposta é capaz de gerar soluções ótimas em curto tempo de processamento, assegurando o suprimento adequado de nutrientes e, simultaneamente, promovendo economia no custo por hectare. Conclui-se que o uso da programação linear constitui uma alternativa eficiente e confiável para auxiliar engenheiros agrônomos e produtores na definição de estratégias de adubação foliar mais sustentáveis e economicamente viáveis.

Palavras-chave: Programação Linear. Método Simplex. Adubação Foliar. Otimização. Fertilizantes. Sustentabilidade.

¹ Graduado em Ciências da Computação, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil.
E-mail: matheus-db@hotmail.com

² Doutor em Engenharia Elétrica e de Computação, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Trindade, Goiás, Brasil. E-mail: bruno.quirino@ifgoiano.edu.br

³ Doutor em Agronomia, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil.
E-mail: marcosmelo@pucgoias.edu.br

⁴ Doutor em Agronomia, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil.
E-mail: felipesantos@pucgoias.edu.br

⁵ Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Trindade, Goiás, Brasil. E-mail: luiz.couto@ifgoiano.edu.br

⁶ Doutor em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil.
E-mail: mcarneiro@pucgoias.edu.br

ABSTRACT

Agribusiness plays a highly relevant role in the global economy, especially in Brazil, and foliar nutrition has a direct influence on crop productivity, in addition to representing a significant portion of production costs. This paper presents a study focused on optimizing the application of foliar fertilizers in agriculture, with emphasis on cost reduction and on meeting plant nutritional requirements. The main objective is to evaluate the feasibility of linear programming, through the Simplex method, as a decision-support tool for selecting and determining the dosage of foliar fertilizers. The methodology is based on the mathematical modeling of the problem, the collection of real field data, and the computational implementation of an algorithm in the Python programming language using specialized optimization libraries. The results demonstrate that the proposed approach is capable of generating optimal solutions within short processing times, ensuring adequate nutrient supply while simultaneously promoting savings in cost per hectare. It is concluded that the use of linear programming constitutes an efficient and reliable alternative to assist agronomists and producers in defining more sustainable and economically viable foliar fertilization strategies.

Keywords: Linear Programming. Simplex Method. Foliar Fertilization. Optimization. Fertilizers. Sustainability.

RESUMEN

El agronegocio desempeña un papel de gran relevancia en la economía global, especialmente en Brasil, y la nutrición foliar tiene una influencia directa en la productividad de los cultivos, además de representar una parte significativa de los costos de producción. Este artículo presenta un estudio orientado a optimizar la aplicación de fertilizantes foliares en la agricultura, con énfasis en la reducción de costos y en el cumplimiento de los requerimientos nutricionales de las plantas. El objetivo principal es evaluar la viabilidad de la programación lineal, mediante el método Simplex, como herramienta de apoyo a la toma de decisiones para la selección y dosificación de fertilizantes foliares. La metodología se basa en la modelación matemática del problema, la recopilación de datos reales de campo y la implementación computacional de un algoritmo en el lenguaje de programación Python utilizando bibliotecas especializadas en optimización. Los resultados demuestran que el enfoque propuesto es capaz de generar soluciones óptimas en tiempos cortos de procesamiento, garantizando el suministro adecuado de nutrientes y, al mismo tiempo, promoviendo ahorros en el costo por hectárea. Se concluye que el uso de la programación lineal constituye una alternativa eficiente y confiable para asistir a agrónomos y productores en la definición de estrategias de fertilización foliar más sostenibles y económicamente viables.

Palabras clave: Programación Lineal. Método Simplex. Fertilización Foliar. Optimización. Fertilizantes. Sostenibilidad.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUÇÃO

O agronegócio desempenha um papel fundamental na economia global, sendo essencial para a produção de alimentos e matérias-primas. No Brasil, a agricultura apresentou participação expressiva nos indicadores econômicos recentes, respondendo por aproximadamente 21% dos empregos formais em 2022, 47,6% das exportações nacionais e 24,8% do Produto Interno Bruto (PIB) (Cepea, 2023; Lamas, 2023). Nesse contexto, a otimização dos processos agrícolas torna-se indispensável para garantir eficiência operacional, controle de custos e qualidade da produção.

Entre as práticas de manejo, a adubação foliar exerce papel relevante no ciclo de cultivo, uma vez que influencia diretamente o desenvolvimento das plantas e, consequentemente, a produtividade e a qualidade dos produtos agrícolas (Reetz, 2016; Ishfaq *et al.*, 2022). A aplicação de nutrientes minerais diretamente nas folhas, conhecida como nutrição foliar, consolidou-se como uma prática amplamente utilizada na agricultura moderna, principalmente por possibilitar rápida absorção e correção de deficiências nutricionais, mesmo em condições adversas de crescimento (Ishfaq *et al.*, 2022).

Além de favorecer o desempenho fisiológico das culturas, a adubação foliar também impacta significativamente os custos de produção, uma vez que os fertilizantes representam parcela expressiva do investimento total realizado pelo produtor rural (Richetti, 2021). Dessa forma, a escolha adequada dos produtos e das respectivas dosagens torna-se um fator determinante para a viabilidade econômica da atividade agrícola.

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade da utilização da programação linear, por meio do método Simplex, como ferramenta de apoio à tomada de decisão na otimização da aplicação de adubos foliares. Busca-se identificar dados relevantes relacionados à adubação foliar, analisar as decisões práticas adotadas em campo e compará-las com as soluções geradas pelo modelo matemático proposto.

Adicionalmente, pretende-se contribuir para o aprimoramento das práticas agrícolas, fornecendo orientações baseadas em dados e em modelagem computacional, capazes de auxiliar engenheiros agrônomos e produtores na maximização da eficiência produtiva e na minimização dos custos associados à nutrição de plantas, promovendo, assim, a sustentabilidade econômica e ambiental do agronegócio.

REFERENCIAL TEÓRICO

A adubação foliar constitui uma prática amplamente utilizada na agronomia, uma vez que possibilita a absorção rápida e eficiente de nutrientes pelas plantas, principalmente na reposição de nutrientes de baixa mobilidade nos tecidos vegetais (Ishfaq *et al.*, 2022). Esse tipo de manejo é especialmente indicado em situações de deficiência nutricional ou quando a absorção via solo é limitada, permitindo a correção pontual de desequilíbrios e contribuindo para o adequado desenvolvimento fisiológico das culturas.

A aplicação foliar pode ser empregada como estratégia complementar à adubação via solo, sobretudo em fases críticas do ciclo de crescimento, quando a demanda nutricional é elevada ou quando fatores edafoclimáticos restringem a disponibilidade de nutrientes no solo (Reetz, 2016). Dessa forma, a nutrição foliar apresenta-se como alternativa eficiente para assegurar o suprimento adequado de macro e micronutrientes, favorecendo o desempenho das plantas mesmo em condições adversas.

Os fertilizantes representam um dos maiores custos na agricultura, podendo corresponder a parcela significativa do custo total de produção como mostra a Tabela 1. Estudos de viabilidade econômica da cultura da soja indicam que os fertilizantes podem representar aproximadamente 24% do custo total por hectare (Richetti, 2021). Esse cenário reforça a importância da adoção de estratégias que possibilitem o uso racional de insumos, de modo a equilibrar produtividade e viabilidade econômica.

Tabela 1. Custo dos componentes e participação relativa no custo de produção da cultura da soja, na região centro-sul de Mato Grosso do Sul, para a safra 2021/2022.

Componente	Soja convencional (R\$ ha ⁻¹)	Participação (%)
1. Insumos	2.658,35	54,24
Sementes	473	9,65
Inoculante	6,2	0,13
Corretivos	135	2,75
Fertilizantes	1.190,00	24,28
Herbicidas	262,11	5,35
Inseticidas	325,55	6,64
Fungicidas	230,25	4,7
Adjuvantes	36,24	0,74
2. Operações agrícolas	427,76	8,72
Distribuição corretivos	49,7	1,01

Semeadura	133,69	2,73
Adubação em cobertura	29,99	0,61
Aplicação de defensivos	85,34	1,74
Colheita	129,04	2,63
3. Custos administrativos	783,95	15,99
Assistência técnica	62,82	1,28
Administração	62,82	1,28
Seguro	11,15	0,23
Juros de custeio	269,63	5,5
Impostos e taxas	196,93	4,02
Transporte da produção	54,6	1,11
Armazenagem	126	2,57
A) COE (1+2+3)	3.870,06	78,95
4. Manutenção	12,95	0,26
Benfeitorias	12,95	0,26
5. Depreciações	188,46	3,84
Máquinas e equipamentos	173,66	3,54
Benfeitorias	14,8	0,3
B) COT (COE+4+5)	4.071,47	83,05
6. Custo de oportunidade	830,34	16,95
Terra	627,91	12,81
Máquinas e equipamentos	163,58	3,34
Benfeitorias	38,85	0,8
Custo total (COT +6)	4.901,81	100

Fonte: CONAB, 2022

Um fator que contribui para a variação nos custos da adubação foliar está associado à diversidade de formulações disponíveis no mercado. Produtos com diferentes concentrações e combinações de nutrientes, tecnologias de fabricação e qualidade de matérias-primas apresentam valores distintos, exigindo do agricultor uma análise criteriosa para selecionar alternativas que ofereçam melhor relação custo-benefício.

Nesse contexto, a programação linear destaca-se como uma técnica de otimização capaz de auxiliar na tomada de decisão em problemas que envolvem a maximização ou minimização de uma função objetivo, sujeita a um conjunto de restrições lineares (Hillier; Lieberman, 2010). Na área agrícola, essa abordagem tem sido empregada para otimizar o uso de recursos, planejar operações e reduzir custos, mantendo níveis adequados de produtividade.

Entre os métodos utilizados para resolver problemas de programação linear, o método Simplex é um dos mais difundidos e eficientes. Esse método baseia-se na exploração iterativa

dos vértices de um conjunto de soluções viáveis até a obtenção da solução ótima (Taha, 2012). Sua robustez e versatilidade tornam-no apropriado para aplicações que envolvem múltiplas variáveis e restrições, como ocorre no planejamento da adubação foliar.

A aplicação da programação linear à adubação foliar permite determinar a combinação ótima de produtos e respectivas dosagens capazes de atender às exigências nutricionais das culturas ao menor custo possível. Dessa forma, essa técnica configura-se como uma ferramenta promissora para engenheiros agrônomos e profissionais do agronegócio, contribuindo para o aprimoramento do manejo nutricional e para a promoção de sistemas agrícolas mais eficientes e sustentáveis.

A programação linear busca otimizar uma função objetivo sujeita a certas restrições expressas por meio de equações lineares (Bregalda; Oliveira; Bornstein, 1981). O método simplex começa com uma solução viável inicial e, em seguida, realiza iterações através de passos que melhoram continuamente a solução até encontrar a solução ótima (Granja; Ruiz, 2006). Ele opera movendo-se de um vértice a outro do espaço de solução viável (chamado de poliedro viável), buscando uma direção que melhore o valor da função objetivo. Durante essas iterações, o método simplex escolhe uma variável básica para entrar na base (aumentando seu valor) e uma variável básica para sair da base (diminuindo seu valor), seguindo o princípio de que cada iteração melhora a solução até que não seja mais possível melhorá-la, momento em que é alcançada a solução ótima.

A forma padrão do modelo de problema consiste em uma função objetivo representada na Equação 1, sujeita a certos critérios como mostra a Equação 2:

$$c_1 * x_1 + c_2 * x_2 + \dots c_n * x_n \quad (1)$$

$$a_{11} * x_1 + a_{12} * x_2 + \dots + a_{1n} * x_n = b_1 \quad (2)$$

$$a_{21} * x_1 + a_{22} * x_2 + \dots + a_{2n} * x_n = b_2$$

...

$$a_{m1} * x_1 + a_{m2} * x_2 + \dots + a_{mn} * x_n = b_m$$

$$x_1, \dots, x_n \geq 0$$

$$x_1, \dots, x_n \geq 0$$

O modelo nos atende de forma que nossa função objetivo seja minimizar os valores gastos nos produtos, sendo “c” a representação do valor de cada produto e “x” a representação da quantidade de cada produto. E as restrições identificam a quantidade de cada nutriente em composição de cada produto seguida da igualdade para suprir essa necessidade, que no caso é a de “ $\geq$ ” pois queremos igualar a necessidade nutricional (“b”) da cultura podendo fornecer mais que o necessário, porém sem faltar qualquer exigência nutricional. Nos atende também que a quantidade de cada produto seja maior ou igual a zero, permitindo apenas a introdução do produto ou não, evitando probabilidades matemáticas impossíveis de serem realizadas, como a negativa de um produto. Todos os dados são visualizados em forma de tabela como a Tabela 2 demonstra.

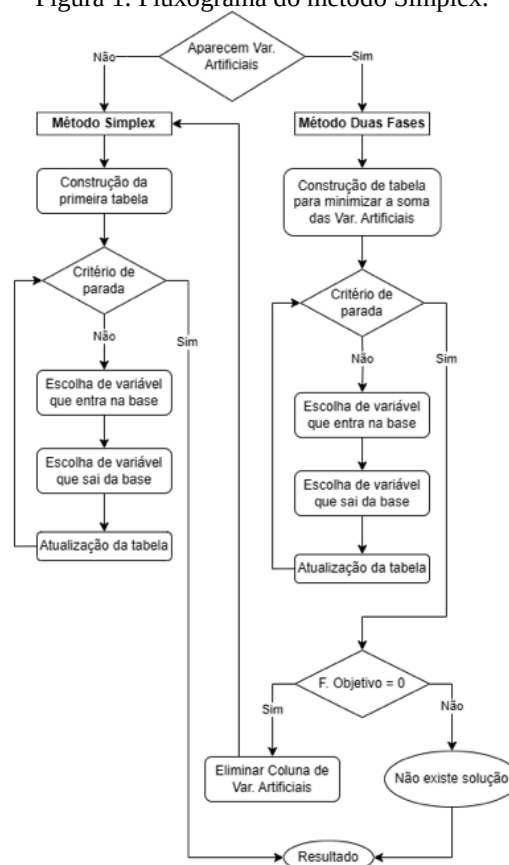
Tabela 2. Dados na forma de tabela.

			C_1	C_2	...	C_n
Base	C_b	P_0	P_1	P_2	...	P_n
P_1	C_{b1}	b_1	a_{11}	a_{12}	...	a_{1n}
P_2	C_{b2}	b_2	a_{21}	a_{22}	...	a_{2n}
...	...	...	...	...	...	...
P_m	C_{bm}	b_m	a_{m1}	a_{m2}	...	a_{mn}
Z		Z_0	Z_1-C_1	Z_2-C_2	...	Z_n-C_n

Fonte: (Granja; Ruiz, 2006).

Para problemas de minimização, o critério de parada ocorre quando a linha Z, que representa a função objetivo, não apresenta mais valores positivos. A variável que entra na base é aquela associada ao maior valor positivo na linha Z, denominada P_j . A variável de saída é determinada pelo menor quociente P_0/P_j , considerando apenas valores estritamente negativos. Inicialmente, é necessário realizar a modelagem do problema (Granja; Ruiz, 2003), definindo as variáveis de decisão, representadas pelo vetor x , conforme a Equação (1). No problema abordado, essas variáveis correspondem aos produtos, e cada valor de x indica a quantidade produzida de cada produto.

Figura 1. Fluxograma do método Simplex.



Fonte: Elaborado pelos autores.

O processo começa identificando se há necessidade de variáveis artificiais para transformar inequações, como as do tipo 'maior ou igual', em equações. Caso sejam requeridas, o Método de Duas Fases é empregado. Esta abordagem inicia com um simplex especializado para minimizar a soma das variáveis artificiais até zero. Uma vez atingido esse objetivo, o algoritmo do Simplex padrão é aplicado para encontrar a solução ótima como mostra a Figura 1.

No final do problema podemos encontrar uma solução ótima, quando o critério de parada é alcançado, porém em casos de critério de parada onde uma variável não básica tenha um valor nulo, isso significa que existem outras soluções ao invés da calculada, portanto, possui infinitas soluções. E por fim não existe solução quando nenhum ponto satisfaz as restrições do problema como demonstra o diagrama na Figura 2.

Para desenvolver um algoritmo de simplex para resolver essa questão específica, optou-se pelo uso da linguagem de programação Python (Python, 1991). Esta escolha se justifica pelos diversos benefícios que a linguagem proporciona, incluindo a biblioteca scipy (SciPy, 2008), que implementa o algoritmo de programação linear nativamente (SciPy, 2008). Isso permite concentrar-se na manipulação e organização dos dados inseridos, simplificando o estudo.

Os dados necessários serão importados de um arquivo .csv, contendo a identificação do produto, sua composição por litro de cada elemento químico e seu custo para o agricultor. Além disso, será importante informar os nutrientes já presentes no solo e aqueles a serem adicionados via adubação foliar.

METODOLOGIA

Inicialmente é necessária uma modelagem do problema a ser resolvido (Granja; Ruiz, 2003). Primeiro devemos determinar nossas variáveis de decisões como mostra a expressão 3, isso é, nosso “x”, no caso abordado elas são os produtos, e seu valor representado por x é a quantidade de cada produto.

$$x_1, \dots, x_n \quad (3)$$

em que:

x = produto

n = variedade do produto

Depois de determinado as variáveis de decisão são necessárias determinar as restrições dos problemas, para nosso caso cada nutriente representa uma restrição, e ela se estabelece como a soma do produto dado pela quantidade do produto “x” vezes a quantidade “a” do nutriente “m” que ele possui, variando em “n” produtos, tudo isso deve atender a restrição de maior ou igual a “bm” que representa a quantidade desejada do nutriente “m”. A expressão é matematicamente expressa como demonstrado na Equação 4.

$$\sum_{n=1}^N a_{mn} \times x_n \geq b_m \quad (4)$$

onde:

a : Quantidade.

b : Quantidade de nutriente.

m : Nutriente.

Então é expresso as condições estabelecidas implicitamente pela natureza das variáveis, ou seja, no nosso problema não tem como aplicar um produto de forma negativa, caso isso seja verdadeiro, o cálculo iria calcular a remoção de nutrientes já contidos, então todas nossas variáveis de decisão devem ser maiores ou iguais a zero, como mostrado na Equação 5, isso é adicionado as restrições.

$$x_1, \dots, x_n \geq 0 \quad (5)$$

E por fim determinamos a função objetivo, nesse problema ela é dada como a soma do produto do valor dos adubos foliares dado por “c” pela quantidade a ser usada dada por “x”, essa função recebe se iguala a Z que representa o custo total calculado. Nossa função objetivo é matematicamente expressa como mostrada na Equação 6.

$$\sum_{n=1}^N c_n \times x_n = Z \quad (6)$$

onde:

c: Valor.

Z: Custo total.

Nesta aplicação busca-se a otimização do custo dessa aplicação foliar, isso é, pretendemos chegar à nutrição necessária da planta gastando o mínimo possível, como nossa função objetivo tem os valores dos adubos foliares, devemos então minimizar essa função, expressando como exemplificado na Equação 7.

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{n=1}^N c_n \times x_n \quad (7)$$

Para a leitura dos dados, por lidar com uma quantidade de dados alta e totalmente variável, pois leva-se em consideração a cultura e os nutrientes necessários para aquela cultura, assim como a diversidade de produtos disponíveis no mercado para aplicação com diferentes composições, então a inserção depende de muitos fatores, por isso foi adotado o uso de um arquivo “.csv” para definir e inserir todos os dados necessários.

Para o arquivo ser lido corretamente é necessário seguir alguns parâmetros de construção,

sendo estruturado da seguinte forma, a primeira coluna é completada pelos nomes dos produtos, nas colunas subsequentes são destinadas cada uma para um nutriente específico, e a última coluna insere o valor de cada um desses produtos. Já as linhas são definidas de forma que a primeira seja o nome dos nutrientes (N, P e K na Tabela 3) representados por cada coluna, sendo assim, a primeira e a última coluna não necessitam de valores, as linhas subsequentes são destinadas a cada produto, e as duas últimas linhas são destinadas respectivamente pelos nutrientes já contidos no solo e na nutrição desejada, essas últimas duas linhas dispensam a primeira e a última coluna também como definido na Tabela 3.

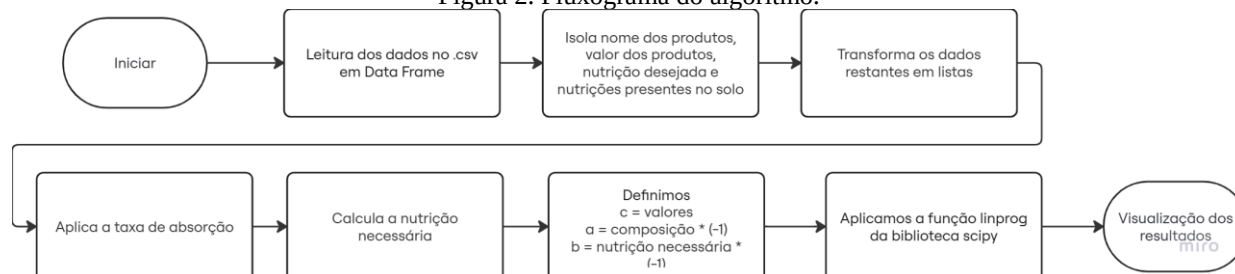
Tabela 3. Exemplo de construção de arquivo .csv com dados fictícios.

	N	P	K	Preço R\$/L
Prod. 1	39.8	0	15	90.00
Prod. 2	25.5	8.3	7	84.30
Prod. 3	10	12.1	8	49.70
Nutrientes no Solo	125.7	12.5	99.8	0
Nutrição Desejada	273	50.82	125.4	0

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os valores dos nutrientes são completados em g/L que cada produto oferece, o valor é o cálculo do Litro do volume, ou seja, R\$/L, e os nutrientes inseridos na adubação via solo, os presentes no solo e o recomendado são na proporção de g/ha. No fim o resultado dará quantos litros de cada produto será necessário por hectare para atingir a nutrição desejada. Para ler e manipular os dados inseridos foi utilizado a biblioteca do python pandas (Pandas, 2011) e para os cálculos de programação linear foi usado a biblioteca scipy (SciPy, 2008).

Figura 2. Fluxograma do algoritmo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Como mostra a Figura 4, inicialmente todo o conteúdo do arquivo .csv é guardado em um *DataFrame* (Pandas, 2011), e a partir desse *DataFrame* é separado cada categoria de informações, inicialmente guardando a primeira coluna descartando as últimas 2 linhas para identificação de

cada produto posteriormente, assim como é feito com os nomes dos produtos, é feito com os valores dos mesmos, mantendo sempre a ordem, assim o valor no índice 1 representa o produto no índice 1, os valores são guardados em uma lista, esses são os “c” da nossa equação.

Quadro 1. Manipulação de dados dos nomes dos produtos e seus valores.

Produtos = ['Prod. 1', 'Prod. 2', 'Prod. 3'] Valores = [90.0, 84.3, 49.7]
--

Fonte: Elaborado pelos autores

Sobrou após essa subtração apenas os valores nos nutrientes de cada produto, assim como os valores da adubação via solo, do existente e do desejado, essas 3 últimas linhas também são separadas em 3 listas diferentes para cálculos posteriores. O restante dos dados que apresentam a formulação de g/L de cada produto então é guardado em uma matriz transposta onde cada linha é um nutriente e cada coluna um produto.

Quadro 2. Manipulação de dados dos dados de solo, nutrição desejada e composições dos produtos.

Solo = [125.7, 12.5, 99.8] Desejado = [273.0, 50.82, 125.4] Composições = [[39.8, 25.5, 10.0], [0.0, 8.3, 12.1], [15.0, 7.0, 8.0]]
--

Fonte: Elaborado pelos autores

Os dados dos nutrientes de cada produto e os nutrientes presentes no solo passam por uma redução levando em conta que nenhum nutriente é totalmente absorvido pela planta, respeitando assim um valor de absorção máximo.

Quadro 3. Manipulação de dados de taxa de absorção e cálculo dos nutrientes do solo e produtos absorvidos.

Absorção = 75% Solo = [94.275, 9.375, 74.85] Composições = [[29.849, 19.125, 7.5], [0.0, 6.225, 9.075], [11.25, 5.25, 6.0]]

Fonte: Elaborado pelos autores

O valor dos nutrientes necessários para a planta é feito usando o valor desejado e retirando dele todo nutriente já presente no solo e na adubação via solo, chegando a uma lista de valores que representa nossos termos independentes (“b”).

Quadro 4. Manipulação de dados de nutrientes necessários.

Necessário = [178.725, 41.445, 50.55]

Fonte: Elaborado pelos autores

Pela nossa necessidade de minimizar nossa função objetivo então a lista de “c” que são os valores dos produtos é entregue sem qualquer mudança, já as listas de nutrientes e da necessidade nutricional são multiplicadas por -1 a fim de inverter seus valores pois as restrições são do tipo “ $\geq$ ”. Os dados dos nutrientes representam nosso “a” e a lista de nutrientes necessários forma nossos termos independentes (“b”).

Quadro 5. Manipulação de dados para adaptar na modelagem do nosso problema.

c = [90.0, 84.3, 49.7]
a = [[-29.849, -19.125, -7.5], [-0.0, -6.225, -9.075],
[-11.25, -5.25, -6.0]]
b = [-178.725, -41.445, -50.55]

Fonte: Elaborado pelos autores

Todos esses valores são jogados então na função “linprog” da biblioteca “scipy”, e utilizando o método “highs” que equivale ao simplex, ele nos dá o resultado da função objetiva e os valores de “x” que é a quantidade de cada produto a ser utilizada.

Quadro 6. Saída do algoritmo.

message: Optimization terminated successfully. (HiGHS Status 7: Optimal)
success: True
status: 0
fun: 662.5738103741851
x: [4.840e+00 0.000e+00 4.567e+00]
...

Fonte: Elaborado pelos autores

O que pode ser lido desse resultado é:

Quadro 7. Visualização dos resultados do algoritmo.

Custo por hectare = R\$ 662.57
Prod. 1 4.84 litros
Prod. 2 0.0 litros
Prod. 3 4.57 litros

Fonte: Elaborado pelos autores

Identificando os produtos e calculando a quantidade final de nutrientes oferecido por eles identificamos o seguinte:

Quadro 8. Verificação do resultado dos nutrientes.

Elemento	Resultado	Recomendado
N	238.3	178.72
P	55.26	41.45
K	109.14	50.55

Fonte: Elaborado pelos autores

Todos os nutrientes desejados foram alcançados já levando em consideração a redução de absorção.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a aplicação dos métodos apresentados utilizamos dados de uma propriedade rural real denominada Fazenda Sussuarana, com sede em Campos Lindos – TO, e com o manejo de foliares completo feito pelo agrônomo Marcos Cintra de Barros sem uso de nenhuma ferramenta específica para auxiliá-lo na tomada de decisão sobre quais produtos comprar.

Os valores dos produtos foram obtidos via nota fiscal de compra e venda feita pela propriedade, assim como alinhamento desses preços com o valor de tabela dos produtos praticados pelo fornecedor. Para diversificar ainda mais o catálogo de produtos em busca de apresentar produtos que poderiam ter sido escolhidos, mas não foram, foi verificada outras opções de adubos foliares com os fornecedores da região.

A composição de cada produto é disponível publicamente nos catálogos das empresas, demonstrando assim quantas gramas de cada elemento tem em um litro do produto, informação essencial para alimentar o sistema. Os dados obtidos do manejo feito na propriedade foram descritos na Tabela 4 a um custo total de R\$ 274,48 por hectare.

Tabela 4. Manejo da propriedade

Produto	Quantidade (Lt/ha)
Borotop	2,03
Alga+	0,4
Flor	1,01
Magnésio	0,61
Fruto Plus Nitro	2,02
Vegetação	2,01
Defesa	0,8

Fonte: Elaborado pelos autores

Os produtos fornecidos na região assim como sua formulação e seus preços foram inseridos no arquivo .csv, organizado como demonstrado na Tabela 5.

Tabela 5. Arquivo .csv de alimentação do algoritmo com dados reais.

	N	K	Ca	B	Mn	Zn	Mo	S	Mg	P	Preço R\$/L
Moltop Concentrado	130	13	0	0	0	0	0	0	0	0	47.5
Flor	126.5	0	65.55	5.75	0	0	0	0	0	0	46.11
Folha Top	115	11.5	0	0	17.2	5.7	0	0	0	0	44.44
Fruto Plus Nitro	42	420	0	0	0	0	1.4	0	0	0	28.75
Alga+	115	0	0	0	11.5	5.7	0	0	0	0	90
Vegetação	39	0	0	3.9	52	6.5	1	26	0	0	22.22
Complex	0	0	0	3.9	65	65	1.3	75.4	0	0	27.08
Magnesio	0	0	0	0	0	0	0	59.5	49.6	0	15.56
Molibdenio 15	0	0	0	0	0	0	195	0	0	0	159.72
P50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	800	48.61
Defesa	0	260	0	0	0	0	0	0	0	0	44.44
Borotop	0	0	0	205	0	0	0	0	0	0	21.74
Nutrientes no Solo	0	96	73	70	287	177	0	21	11	16	0
Nutrição Desejada	273	125.4	40.26	254.1	429	201.3	23.1	50.82	80	50.82	0

Fonte: Elaborado pelos autores

A nutrição desejada para a cultura, expressa na última linha do arquivo.csv e consequentemente na Tabela 6 foi definida pelo Agrônomo responsável pela cultura devido a necessidade das recomendações de micronutrientes na soja serem feitas em função de informações locais (experimentos, sintomas de deficiência etc.) (Ribeiro,1999)9. Já na alinha acima desta foi inserido as informações de nutrientes já presentes no solo atual fornecido pelo agrônomo após análise do solo, assim como a taxa de absorção de nutrientes é escolhido pelo agrônomo de acordo com experiências.

Tabela 6. Manejo recomendado

Produto	Quantidade (Lt/ha)
Moltop Concentrado	0,0
Flor	0,0
Folha Top	1,84
Fruto Plus Nitro	0,12
Alga+	0,0
Vegetação	3,79
Complex	0,87
Magnesio	1,93
Molibdenio 15	0,13
P50	0,06
Defesa	0,0
Borotop	1,22

Fonte: Elaborado pelos autores

Os resultados obtidos sugeriram o manejo apresentado na Tabela 6 a um custo total de R\$ 273,51 após um tempo de processamento do algoritmo de 0,6 segundos.

Ao fazer a análise do resultado obtido identificamos que ele conseguiu suprir todas as necessidades nutricionais necessárias no caso de uso apresentado, apresentando também um custo

por hectare de R\$ 273,51 em fertilizantes. Ao fazer a análise dos dados reais fornecidos pela propriedade chegamos ao valor de R\$ 274,48 por hectare, porém como apresentado na Tabela 6 o manejo feito sem ferramentas de auxílio não conseguiu suprir a necessidade nutricional da soja em poucos elementos apresentados, piorando mais ainda o resultado apresentado ao aplicar o desconto de absorção da planta, que nesse caso de teste foi de 75%, que é a taxa comumente utilizada na tomada de decisão manual pelo agrônomo na propriedade.

Tabela 7. Análise dos resultados.

Nutriente	Necessário (g/ha)	Propriedade Real			Calculado		
		Aplicado (g/ha)	Absorvido (g/ha)	Atendido (%)	Aplicado (g/ha)	Absorvido (g/ha)	Atendido (%)
N	273	337	252,75	93%	364	273	100%
K	53,4	1059,4	794,55	1488%	71,2	53,4	100%
Ca	0	66,21	49,6575	∞	0	0	100%
B	201,6	429,8	322,35	160%	268,8	201,6	100%
Mn	213,75	109,12	81,84	38%	285	213,75	100%
Zn	68,55	15,34	11,505	17%	91,4	68,55	100%
Mo	23,1	4,84	3,63	16%	30,8	23,1	100%
S	35,07	88,55	66,4125	189%	278,63	208,9725	596%
Mg	71,75	30,26	22,695	32%	95,67	71,7525	100%
P	0	0	0	100%	0	0	100%

Fonte: Elaborado pelos autores

A Tabela 7 mostra que o manejo implementado sem ferramentas só alcançou a nutrição necessária em apenas três elementos, e nelas ainda apresentaram uma nutrição acima do necessário, sendo assim, desperdiçando nutriente e produto, aplicando mais da metade a mais (160%) de Boro (B) necessário, quase o dobro (189%) de Enxofre (S) necessário e uma grande discrepância apresentada onde foi manejado 14 vezes (1488%) mais que o necessário de Potássio (K), e a aplicação de Cálcio (Ca) que não era necessária, já que no solo possuía a quantidade recomendada. Nos outros elementos em nenhum foi alcançada a nutrição necessária, em quadro destes não chegando nem a metade. O único elemento que foi introduzido de forma satisfatória usando esse manejo foi o Nitrogênio e mesmo ele não alcançou a necessidade real.

Em contrapartida o manejo calculado conseguiu fornecer a nutrição desejada em todos os elementos apresentados a um custo menor (R\$ 0,97 por hectare), mesmo com menor valor ele conseguiu aplicar seis vezes mais Enxofre (S) que no necessário que será desperdiçado, ou poderá se manter no solo. Essa aplicação extra de Enxofre é devido a um dos produtos que possui Enxofre em sua composição foi o que melhor contribuiu em custo para chegar à nutrição necessária de outro elemento.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstraram que a ferramenta de programação linear alinhado ao método simplex pode ajudar o agrônomo na tomada de decisão em campo, economizando no custo da lavoura e reduzindo o tempo, visto que a ferramenta opera de forma quase instantânea e apresentando resultados em uma solução ótima.

O algoritmo, porém, não trabalha sozinho, ele tem a necessidade de se fazer uma análise de solo frequente na propriedade para ajudar o algoritmo na tomada de decisão mais assertiva assim como o profissional da área saber dosar as recomendações das plantas para o solo da área e o clima. O catálogo dos produtos deve-se manter atualizado para entrada de novos produtos e readequação dos preços.

Por fim o algoritmo demonstra em valores quebrados qual a dosagem correta para cada produto, dependendo de o trabalhador em campo saber dosar corretamente os produtos para a área, assim como ele mostra um resultado ótimo, porém sem levar em consideração as tecnologias de cada produto, devendo assim o agrônomo avaliar o resultado e fazer ajustes para melhor aproveitamento.

O algoritmo cumpriu seu papel de agilizar a escolhas dos produtos levando em consideração nutrição e custo da lavoura, sendo uma ferramenta rápida e de fácil operação já que utiliza um arquivo amplamente usado como o .csv.

AGRADECIMENTOS

Expressa-se reconhecimento ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano (IF Goiano) pelo apoio institucional e pelo auxílio financeiro concedido, os quais se constituíram em elementos essenciais para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

APÓS ALCANÇAR PATAMAR RECORDE EM 2021, PIB DO AGRONEGÓCIO RECUA 4,22% EM 2022. [S. l.], 17 mar. 2023. Disponível em: [https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/PIB-DO-AGRONEGOCIO-2022.17MAR2023\(1\).pdf](https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/PIB-DO-AGRONEGOCIO-2022.17MAR2023(1).pdf). Acesso em: 8 nov. 2023.

BORKERT, Clóvis Manuel *et al.* **Seja o doutor da sua soja. Informações Agronômicas**, [s. l.], n. 66, jun. 1994. Disponível em: [https://www.npct.com.br/npctweb/npct.nsf/article/BRS-3140/\\$File/Seja%20Soja.pdf](https://www.npct.com.br/npctweb/npct.nsf/article/BRS-3140/$File/Seja%20Soja.pdf). Acesso em: 19 out. 2023.

BREGALDA, Paulo F.; OLIVEIRA, Antonio A. F. de; BORNSTEIN, Cláudio T. **Introdução à programação linear**. [S. l.: s. n.], 1981.

GRANJA, Daniel Izquierdo; RUIZ, Juan José Ruiz. **Teoria do método Simplex**. [S. l.], 2006. Disponível em: https://www.phpsimplex.com/pt/teoria_metodo_simplex.htm. Acesso em: 19 out. 2023.

GRANJA, Daniel Izquierdo; RUIZ, Juan José Ruiz. **Teoria sobre modelagem de problemas**. [S. l.], 2006. Disponível em: https://www.phpsimplex.com/pt/teoria_modelagem_problemas.htm. Acesso em: 19 out. 2023.

ISHFAQ, Muhammad *et al.* **Foliar nutrition: Potential and challenges under multifaceted agriculture**. Environmental and Experimental Botany, [s. l.], 13 maio 2022.

LAMAS, Fernando Mendes. **A evolução da agricultura do Brasil**. [S. l.]: Embrapa, 5 jul. 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/81665485/artigo---a-evolucao-da-agricultura-do-brasil>. Acesso em: 7 nov. 2023.

PANDAS. [S. l.], 2011. Disponível em: <https://pandas.pydata.org/>. Acesso em: 16 ago. 2023.
PANDAS.DATAFRAME. [S. l.], 2011. Disponível em: <https://pandas.pydata.org/docs/reference/api/pandas.DataFrame.html>. Acesso em: 16 ago. 2023.

PYTHON. [S. l.], 1991. Disponível em: <https://www.python.org/>. Acesso em: 16 ago. 2023.

REETZ, Harold F. **Fertilizantes e seu uso eficiente**. 1. ed. [S. l.: s. n.], 2016. Disponível em: <https://www.ufla.br/dcom/wp-content/uploads/2018/03/Fertilizantes-e-seu-uso-eficiente-WEB-Word-Outubro-2017x-1.pdf>. Acesso em: 8 nov. 2023.

RIBEIRO, Antonio Carlos; GUIMARÃES, Paulo Tácito G.; ALVAREZ V., Victor Hugo. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. [S. l.: s. n.], 1999.

RICHETTI, Alceu. **Viabilidade econômica da cultura da soja para a safra 2021/2022, em Mato Grosso do Sul**. Embrapa, [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1133296/1/COT-262-2021.pdf>. Acesso em: 8 nov. 2023.

SCIPY. [S. l.], 2008. Disponível em: <https://scipy.org/>. Acesso em: 16 ago. 2023.
SCIPY.OPTIMIZE.LINPROG. [S. l.], 2008. Disponível em: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.linprog.html>. Acesso em: 16 ago. 2023.