

UFRRJ

**INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AGRONOMIA – CIÊNCIA DO SOLO**

DISSERTAÇÃO

**Importância da Incorporação do Calcário no
Preparo do Solo para o Cultivo da Soja [*Glycine max*
(L.) Merr.] em Áreas de Conversão
Pastagem/Lavoura no Norte Fluminense**

Pascoal Pereira Rodrigues

2023



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA –
CIÊNCIA DO SOLO**

**IMPORTÂNCIA DA INCORPORAÇÃO DO CALCÁRIO NO PREPARO
DO SOLO PARA O CULTIVO DA SOJA [*Glycine max* (L.) MERR.] EM
ÁREAS DE CONVERSÃO PASTAGEM/LAVOURA NO NORTE
FLUMINENSE**

PASCOAL PEREIRA RODRIGUES

Sob a Orientação do Professor
Jerri Édson Zilli

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre**, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, Área de Concentração em Biologia do Solo.

Seropédica, RJ
Fevereiro de 2023

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central/Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
Com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R696i	<p>Rodrigues, Pascoal Pereira, 1974- Importância da incorporação do calcário no preparo do solo para o cultivo da soja [<i>Glycine max</i> (L.) MERR.] em áreas de conversão pastagem/lavoura no Norte Fluminense / Pascoal Pereira Rodrigues. – Seropédica, 2023. 54 f. : il.</p> <p>Orientador: Jerri Édson Zilli. Dissertação (Mestrado). – – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Agronomia Ciência do Solo, 2023.</p> <p>1. Fixação Biológica de Nitrogênio. 2. Calagem. 3. Bactérias. I. Zilli, Jerri Édson, 1974-, orient. II Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Ciência do Solo III. Título.</p>
-------	--

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

É permitida a cópia parcial ou total desta Dissertação, desde que seja citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA (CIÊNCIAS DO SOLO)



HOMOLOGAÇÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 9 / 2023 - CPGACS (12.28.01.00.00.00.27)

Nº do Protocolo: 23083.011610/2023-66

Seropédica-RJ, 02 de março de 2023.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO

INSTITUTO DE AGRONOMIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA - CIÊNCIA DO SOLO

PASCOAL PEREIRA RODRIGUES

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Ciência do Solo, Área de Concentração em Biologia do Solo.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 28/02/2023.

Jerri Édson Zilli. Dr. Embrapa

(Orientador)

Everaldo Zonta. Dr. UFRRJ

Jorge Jacob Neto. Dr. UFRRJ

Cláudia Pozzi Jantalia Dra. Embrapa

(Assinado digitalmente em 02/03/2023 19:19)

EVERALDO ZONTA
IA (12.28.01.21)
Matrícula: 2213075

(Assinado digitalmente em 04/03/2023 16:06)

JORGE JACOB NETO
DeptFITO (12.28.01.00.00.00.32)
Matrícula: 387256

(Assinado digitalmente em 03/03/2023 07:07)

JERRI EDSON ZILLI
CPF: 927.881.579-91

(Assinado digitalmente em 08/03/2023 11:06)

CLAUDIA POZZI JANTALIA
CPF: 139.630.858-00

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrj.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **9**, ano: **2023**, tipo: **HOMOLOGAÇÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**, data de emissão: **02/03/2023** e o código de verificação: **dc4b74266a**

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me concebido a vida e pela capacidade de interpretar as coisas do mundo e por iluminar o meu caminho.

À minha família e em especial à minha mãe Dona Lurdes, pelo apoio em todos os momentos de minha vida. Ao meu pai Dico Rodrigues (*in memoriam*).

Agradeço à Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro pelas oportunidades oferecidas durante minha vida acadêmica e pelos momentos de construção de grandes amizades e o aprendizado em convívio social.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Ciências do solo e aos seus professores.

À Embrapa Agrobiologia pela oportunidade e apoio no desenvolvimento dos trabalhos da dissertação. A todos os funcionários da Embrapa Agrobiologia que contribuíram com a construção deste trabalho.

Ao orientador, Professor Dr. Jerri Zilli, pela confiança, paciência e por todo o seu apoio durante a realização deste trabalho.

Ao Professor Dr. Jorge Jacob Neto por ter concedido o estágio à docência e a oportunidade de acompanhar um experimento de soja desde a implantação à colheita.

À Professora Dra. Erica Souto Abreu Lima e ao Professor Dr. Eduardo Lima que esclareceram dúvidas sobre análise estatística e fertilidade do solo, respectivamente.

Aos meus amigos com os quais eu aprendi a não desistir de meus sonhos. E também a todos aqueles que contribuíram com minha formação profissional, direta ou indiretamente.

À Fazenda Abadia por ter concedido o local para a montagem do experimento e também pela sua condução.

Ao Engenheiro-agrônomo, Josimar Nogueira Batista, pesquisador da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, campus Campos dos Goytacazes, RJ, que participou da montagem do experimento, do manejo da cultura e da coleta do experimento.

Ao Dr. José Francisco Lumbreras que descreveu o perfil de solo na Fazenda Abadia.

Aos técnicos de campos experimentais da Embrapa Agrobiologia: Athayde Mendes Fernandes e Alderi Ferreira da Silva que contribuíram com as análises de produtividade dos grãos da soja.

Ao técnico João Luiz Bastos e à analista Karine Moura de Freitas que cederam o Laboratório de Ecologia Microbiana para acondicionar as amostras de raízes da soja.

Aos meus amigos que me ensinaram os primeiros passos da análise estatística: Dra. Natália dos Santos Ferreira e o Doutorando Ricardo Amaro de Sales.

Ao Dr. Luiz Fernando de Sousa Antunes, responsável pela formatação do texto.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos, sem a qual eu não teria realizado este sonho.

RESUMO

RODRIGUES, Pascoal Pereira. **Importância da incorporação do calcário no preparo do solo para o cultivo da soja [*Glycine max* (L.) Merr.] em áreas de conversão pastagem/lavoura no Norte Fluminense**. 2023. 54p. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2023.

O Brasil se destaca no cenário mundial como maior produtor de soja [*Glycine max* (L.) Merr.]. Com o declínio da cana de açúcar no Norte Fluminense, surgiu uma oportunidade para a exploração da cultura da soja, que pode contribuir com a geração de emprego e renda na região. A correção da acidez do solo é uma prática agrícola importante para o desenvolvimento da soja. A deficiência de Ca^{2+} e a toxidez causada por Al^{3+} são os fatores químicos que mais limitam a produtividade das culturas em solos ácidos de regiões tropicais. O objetivo desse trabalho foi avaliar a interferência da forma de calagem (superficial e incorporada ao solo) sobre a fixação biológica de nitrogênio e no desenvolvimento da soja, no Norte Fluminense. O experimento foi conduzido na safra 2021/2022 em faixas, em um Neossolo Flúvico Tb Distrófico típico, textura média/arenosa, na fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes, RJ. Durante o mês junho/julho de 2020, a área foi dividida em dois talhões, com dimensões de aproximadamente 70 x 70 m. O primeiro foi gradeado, seguindo-se da aplicação uma tonelada de calcário dolomítico (PRNT 76%) à lanço + 0,5 t ha⁻¹ de gesso, e de uma nova gradagem a 20 cm profundidade. No segundo talhão, aplicou-se a mesma quantidade de calcário e gesso, porém sem o revolvimento do solo. Posteriormente, semeou-se *Brachiaria ruziziensis* nos dois talhões e logo após seu crescimento, efetuou-se a dessecação e fez o plantio da soja. Em maio de 2021 realizou-se um novo semeio de *B. ruziziensis* em ambas os talhões. No início do mês de outubro, dessecou-se a *B. ruziziensis* e realizou o plantio direto da soja, nas duas áreas. Na adubação de plantio aplicou-se uma mistura de 100 kg ha⁻¹ de P_2O_5 , 80 kg ha⁻¹ de K_2O e 50 kg ha⁻¹ de FTE BR12. Quatro cultivares de soja transgênica foram cultivadas. A calagem incorporada corrigiu melhor a acidez do solo e disponibilizou maiores teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e P para as plantas. Na calagem incorporada, as plantas apresentaram maior valor médio para raízes secundárias por planta, em comparação com a calagem superficial. Na calagem incorporada as plantas apresentaram maior massa seca da parte aérea. Também houve maior acúmulo de nutrientes na parte aérea da soja. As plantas acumularam em média 121 mg planta⁻¹ de N na calagem incorporada e 88 mg planta⁻¹ de N na calagem superficial. A média da massa de nódulos secos foi de 264 mg planta⁻¹ na calagem incorporada, enquanto na calagem superficial esse valor foi em média de 198 mg planta⁻¹, não apresentando interação entre os fatores (calagem e cultivar). Os parâmetros produtivos das plantas de soja foram afetados pela forma de calagem, apresentando interação para o número de vagens por planta e não apresentando interação para a massa de 100 grãos e para a produtividade da soja. O maior número de vagens sadias por planta e a maior massa de 100 grãos, ocorreu quando a calagem foi incorporada ao solo. A produtividade média da soja na calagem incorporada foi de 3.707 kg ha⁻¹, enquanto na calagem superficial foi 1.982 kg ha⁻¹. A incorporação do calcário em profundidade em áreas que precisam ter as condições de atributos químicos do solo melhorados apresenta-se como um manejo que traz ganhos de curto prazo na fertilidade do solo e na produção, nas condições edafoclimáticas da região de Campos dos Goytacazes, RJ.

Palavras-chave: Fixação Biológica de Nitrogênio. Calagem. Bactérias. *Glycine max* (L.).

ABSTRACT

RODRIGUES, Pascoal Pereira. **Importance of limestone incorporation in soil preparation for soybean cultivation [*Glycine max* (L.) Merr.] in pasture/crop conversion areas in the North of Rio de Janeiro.** 2023. 54f. Dissertation (Master Science in Agronomy, Soil Science). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2023.

Brazil stands out globally as the largest producer of soybeans [*Glycine max* (L.) Merr.]. With the decline of sugarcane in the Northern Fluminense region, an opportunity arose for the exploration of soybean crop, which can contribute to job and income generation in the region. Soil acidity correction through liming is an important agricultural practice for the development and production of soybean. Ca^{2+} deficiency and toxicity caused by Al^{3+} are the chemical factors that most limit crop yield in acid soils in tropical regions. The aim of this study was to evaluate the interference of liming method (surface and incorporated into the soil) on nitrogen fixation and soybean development in the Northern Fluminense region. The experiment was carried out in the 2021/2022 harvest season in large plots on a typical Dystrophic Fluvisol with medium/sandy texture at Abadia farm, Campos dos Goytacazes, RJ. In June/July of 2020, the area, previously occupied by pasture, was divided into two large plots, with dimensions of about 70 x 70 m. The first plot was plowed to a depth of about 20 cm for soil disturbance, followed by the application of one ton of dolomitic limestone (PRNT 76%) broadcasted + 0.5 t ha⁻¹ of gypsum, and a new plowing at the same depth. In the second plot, the same amount of limestone and gypsum was applied, but without soil disturbance. Later, *Brachiaria ruziziensis* was sown in both plots, and a light plowing was carried out for seed incorporation. Subsequently, soybeans were planted between October and February of the 2020/21 season. Again, in May 2021, a new sowing of *B. ruziziensis* was carried out in both plots with incorporated and surface liming from the previous crop. At the beginning of October, *B. ruziziensis* was desiccated, and two weeks after that, no-tillage planting of soybean was performed in both areas. At planting, a mixture of 100 kg ha⁻¹ of P_2O_5 , 80 kg ha⁻¹ of K_2O , and 50 kg ha⁻¹ of FTE BR12 was applied. Four transgenic soybean cultivars were grown. Incorporated liming corrected soil acidity better and made higher levels of Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , and P available to plants. The average Al^{3+} levels were lower with incorporated liming. In incorporated liming, plants had an average of 65 secondary roots per plant, while in surface liming, the average was 52. In incorporated liming, plants had greater shoot dry mass, presenting an interaction between liming and cultivar. There was also an interaction for the accumulation of Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , P, and N in the soybean shoot. Plants accumulated on average 121 mg plant⁻¹ of N in incorporated liming and 88 mg plant⁻¹ of N in surface liming. The average dry nodule mass was 264 mg plant⁻¹ in incorporated liming, while in surface liming, this value was on average 198 mg plant⁻¹, with no interaction between factors (liming and cultivar). The productive parameters of soybean plants were affected by the form of liming, presenting interaction for the number of pods per plant and no interaction for the mass of 100 grains and soybean yield. The highest number of healthy pods per plant and the highest mass of 100 grains occurred when lime was incorporated into the soil. The average soybean productivity in the incorporated liming was 3,707 kg ha⁻¹, while in the surface liming it was 1,982 kg ha⁻¹. The incorporation of limestone in depth in areas that need to have the soil chemical attributes improved is a management that brings short-term gains in soil fertility and production, in the edaphoclimatic conditions of the Campos dos Goytacazes region, RJ."

Keywords: Biological Nitrogen Fixation. Liming. Bacteria. *Glycine max* (L.).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área e produção da soja no Brasil (CONAB, 2023).....	3
Figura 2. Produtividade da soja no Brasil (CONAB, 2023).....	4
Figura 3. Produtividade da soja nos principais estados produtores (CONAB, 2023).	4
Figura 4. Relação entre a disponibilidade de nutrientes e pH do solo. Fonte: (MALAVOLTA, 1979)	7 7
Figura 5. Localização do experimento de soja na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes, RJ.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Pluviosidade acumulada por decêndio (INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2022) para o município de Campos dos Goytacazes-RJ.....	11
Tabela 2. Caracterização química e granulometria do solo antes da implantação do experimento da safra 2019/2020 na área da fazenda Abadia no Norte Fluminense.....	12
Tabela 3. Principais características das cultivares de soja, utilizadas no experimento, na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.....	13
Tabela 4. Características de cultivares na área da calagem incorporada, em experimento para comparação de formas de calagem em solo cultivado com soja na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.....	15
Tabela 5. Características das cultivares na área da calagem superficial, em experimento para comparação de formas de calagem em solo cultivado com soja na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.....	15
Tabela 6. Teor de cálcio em experimento para comparação de formas de calagem em solo cultivado com soja na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022...	18
Tabela 7. Teor de magnésio em experimento para comparação de formas de calagem em solo cultivado com soja na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022...	19
Tabela 8. Valor do pH em experimento para comparação de formas de calagem em solo cultivado com soja na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022...	20
Tabela 9. Teor de alumínio em experimento para comparação de formas de calagem em solo cultivado com soja na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022...	21
Tabela 10. Teor de fósforo em experimento para comparação de formas de calagem em solo cultivado com soja na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022...	22
Tabela 11. Teor de potássio em comparação a formas de calagem em solo cultivado com soja na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.	24
Tabela 12. Soma de bases (S%) em diferentes formas de calagem em solo cultivado com soja na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.	25
Tabela 13. Valor da CTC em experimento para comparação de formas de calagem em solo cultivado com soja na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022...	25
Tabela 14. Valor V (%) em experimento para comparação de formas de calagem em solo cultivado com soja na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022...	26
Tabela 15. Saturação por alumínio (m%) em experimento para comparação de formas de calagem em solo cultivado com soja na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.	27
Tabela 16. Teores de matéria orgânica no solo, na linha e entrelinha de plantio da soja, em diferentes profundidades, em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.....	28
Tabela 17. Massa de nódulos secos e número de nódulos de plantas de soja em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.	29
Tabela 18. Comprimento de raízes da soja, em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.....	30
Tabela 19. Número de raízes secundárias e volume de raízes da soja, em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.	31

Tabela 20. Massa seca de raízes em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.....	32
Tabela 21. Massa seca da parte aérea em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.	32
Tabela 22. Acúmulo de cálcio na parte aérea da soja em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022...	33
Tabela 23. Acúmulo de potássio na parte aérea da soja em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022...	34
Tabela 24. Acúmulo de magnésio na parte aérea da soja em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022...	34
Tabela 25. Acúmulo de fósforo na parte aérea da soja em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022...	35
Tabela 26. Acúmulo de nitrogênio na parte aérea da soja em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022...	35
Tabela 27. Número de nós em plantas de soja, em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.....	36
Tabela 28. Número de vagens em plantas de soja, em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.....	37
Tabela 29. Número de vagens sadias em plantas de soja, em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022...	37
Tabela 30. Comprimento de uma vagem de soja, em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.....	38
Tabela 31. Número de grãos de uma vagem de soja, em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022...	38
Tabela 32. Massa de 100 grãos de soja (13% de umidade), em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.	39
Tabela 33. Produtividade da soja em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.....	40

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Produção de Soja no Brasil - Safra 2021/2022.....	3
2.2 Fixação Biológica de Nitrogênio pela Soja.....	4
2.3 Inoculantes	6
2.4 Correção do Solo.....	7
2.5 Gessagem	10
3. MATERIAL E MÉTODOS	11
3.1 Caracterização da Área Experimental	11
3.2 Delineamento Experimental e Tratamento.....	11
3.3 Inoculação da Semente.....	13
3.4 Cultivares de Soja	13
3.4.1 Características das cultivares de soja	13
3.5 Caracterização Química do Solo	13
3.5.1 Coleta de solo na linha e entrelinha de plantio da soja	13
3.6 Caracterização Agrônômica da Soja	14
3.6.1 Coleta da parte aérea e de raízes com os nódulos	14
3.6.2 Altura de planta e inserção da primeira vagem	14
3.6.3 Componentes de produção	14
3.6.4 Produtividade da soja	15
3.6.5 Medições e observações no campo	15
3.7 Análise Estatística	16
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
4.1 Fertilidade do Solo	17
4.2 Matéria Orgânica.....	27
4.3 Nodulação das Plantas de Soja nas duas Formas de Calagem	28
4.4 Comprimento da Raiz Principal, Número de Raízes Secundárias e Volume de Raízes das Plantas de Soja.....	29
4.5 Massa Seca da Parte Aérea da Soja e de Raízes.....	31
4.6 Acúmulo de Nutrientes na Parte Aérea da Soja	32
4.7 Componentes de Produção da Soja	36
4.8 Produtividade da Cultura da Soja Entre as Duas Formas de Calagem.....	39
5. CONCLUSÕES	41
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42
7. ANEXOS	51

1. INTRODUÇÃO

A cultura da soja [*Glycine max* (L.) Merr.] tem como centro de origem a região leste da Ásia. Ela foi introduzida no Brasil no final do século XIX no Estado da Bahia (BONATO; BONATO, 1987). Destaca-se pelo seu elevado teor de proteína e óleo nos grãos, 40% e 21% respectivamente, em média (PERKINS, 1995; BAGALE, 2021). Além disso, apresenta outros diversos compostos, importantes para alimentação humana e de animais.

A região Norte Fluminense possui cerca de 22% da área do Estado do Rio de Janeiro e compreende nove municípios: Campos dos Goytacazes, Carapebus, Cardoso Moreira, Conceição de Macabu, Macaé, Quissamã, São João da Barra, São Fidélis e São Francisco do Itabapoana. Essa região, principalmente Campos dos Goytacazes, possui um histórico de mais de um século na produção canavieira, apresentando no início dos anos de 1990 uma área cultivada com esta cultura superior a 220 mil ha e cerca de 20 usinas sucroalcooleiras. No final do século passado, a lavoura canavieira entrou em fase de declínio, restando atualmente apenas 20 mil ha cultivados (ZILLI et al., 2022). Áreas que eram cultivadas com a lavoura da cana, estão sendo utilizadas em boa parte para a produção de bovinos de forma extensiva ou semiextensiva (EMATER-RJ, 2018).

Uma parte importante das áreas da região norte fluminense está fora do processo de produção agrícola, ficando sob riscos de degradação do solo. Isso pode também ser visto como uma oportunidade para a exploração de outras culturas agrícolas, como por exemplo, a soja, contribuindo com o PIB agrícola do Estado do Rio de Janeiro, gerando emprego e fomentando a economia na região (ZILLI et al., 2022).

Nos últimos cinco anos, produtores da região norte fluminense vêm demonstrando grande interesse pelo cultivo de grãos, principalmente a soja, criando uma demanda às instituições de pesquisa e extensão para indicação de cultivares adaptadas a essa região (ZILLI et al., 2022). De acordo com estes pesquisadores, um estudo realizado a partir de informações de levantamento de solos, declividade de terreno e ocupação das terras, indicou haver cerca de 320 mil ha de área com potencial para o cultivo de grãos na região.

A soja é a cultura em que se aproveita enormemente a fixação biológica de nitrogênio (FBN), havendo resposta à inoculação das sementes com estirpes eficientes de bactérias do gênero *Bradyrhizobium* que contribuem com taxas de FBN superiores a 80% (ALVES et al., 2006) e alto rendimento de grãos (ZILLI et al., 2010; MORETTI et al., 2020).

Desde a década de 1990, quatro estirpes de *Bradyrhizobium* foram utilizadas comercialmente para a cultura da soja no Brasil: *B. elkanii* SEMIA 587 e SEMIA 5019 (= BR 29); *B. japonicum* SEMIA 5079 (= CPAC 15); e *B. diazoefficiens* SEMIA 5080 (= CPAC 7), anteriormente identificado como *B. japonicum* (DELAMUTA et al., 2013).

A correção da acidez do solo através da calagem é uma prática agrícola importante para a obtenção de elevadas produtividades de soja. A acidez elevada do solo (baixo pH) é um fator limitante ao desenvolvimento das plantas, pelo efeito indireto do pH: aumento da disponibilidade de Alumínio a níveis considerados tóxicos e pelo efeito direto do pH que provoca a deficiência de nutrientes essenciais, tais como; nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, molibdênio e cloro (LOURENÇÃO et al., 2018). Cabe destacar, de acordo com esses autores, que a calagem também fornece Cálcio e Magnésio, dois macronutrientes essenciais ao desenvolvimento da cultura. Em solos de elevada acidez, a eficiência na utilização de nutrientes pelas plantas é menor, motivo pelo qual se deve priorizar a calagem como a primeira prática agrícola a ser feita, na fase anterior ao estabelecimento da cultura no campo (STREDO, 2008).

Diante do contexto, as hipóteses científicas consideradas nesta dissertação foram: (I) A cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merr.) responde de modo diferente à aplicação de calcário em superfície em comparação ao calcário incorporado ao solo; (II) Diferentes cultivares de soja tende a apresentar padrões de resposta semelhantes quanto a forma de calagem; e (III) A forma de calagem influencia na nodulação e acúmulo de nitrogênio na cultura da soja.

O objetivo geral do trabalho foi avaliar a interferência da forma de calagem em superfície e incorporada ao solo, sobre a fixação biológica de nitrogênio e desempenho de cultivares de soja, no Norte Fluminense. Os objetivos específicos foram: (I) Avaliar a fertilidade do solo em relação às formas de calagem; (II) Avaliar a nodulação, produção de biomassa e o acúmulo de nitrogênio na parte aérea da cultura da soja em diferentes formas de calagem; (III) Avaliar os componentes de produção e a produtividade de cultivares de soja submetida a calagem incorporada ao solo e calagem superficial.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Produção de Soja no Brasil - Safra 2021/2022

De acordo com os dados apresentados pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2023), o Brasil aparece em posição de destaque no cenário mundial como produtor de soja. Estudos dessa entidade revelam que na safra 2021/2022, foram plantados 40.950,6 mil ha no país, com uma produção 124.047,8 mil toneladas (t), segundo estimativas (Figura 1). Durante esse período de análise observou-se que houve um aumento da produção, porém esse aumento não foi acompanhado pelo aumento da área plantada, mas principalmente pelo aumento de produtividade (Figura 2).

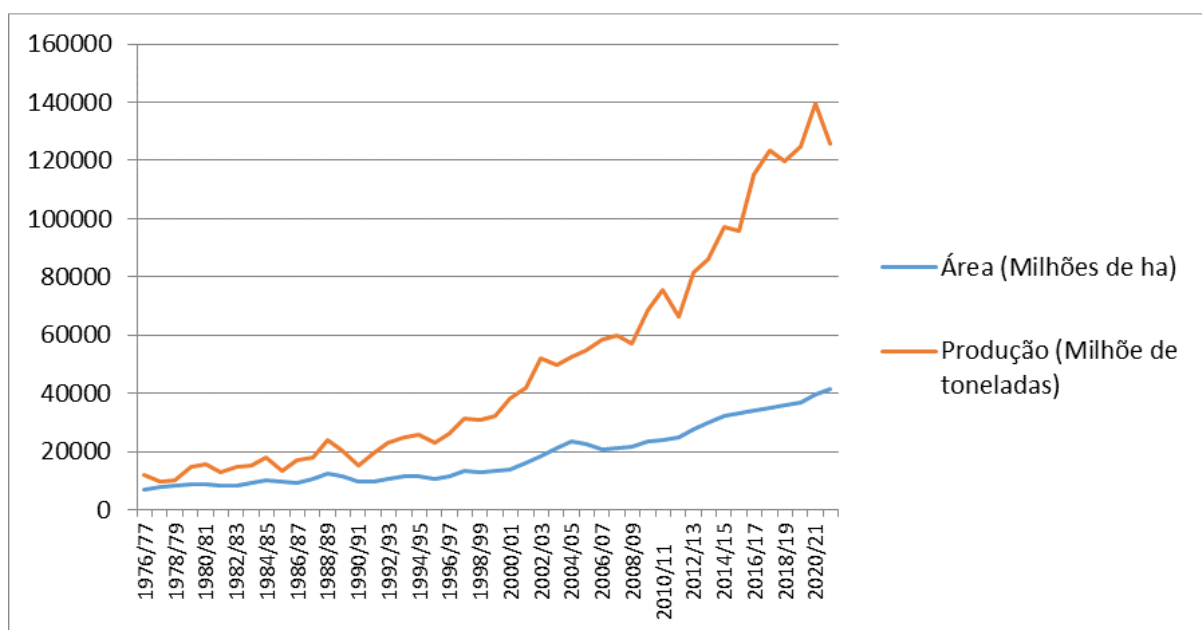


Figura 1. Área e produção da soja no Brasil (CONAB, 2023).

A produtividade média nacional está estimada pela CONAB em 3.204 kg ha⁻¹ (safra 2021/2022) (Figura 2). Nesta safra, entre os estados brasileiros, os maiores produtores dessa oleaginosa, em mil toneladas, destacam-se: Matogrosso (40.746,6); Goiás (16.032,3); Paraná (12.250,3); Rio Grande do Sul (9.111,0); Mato Grosso do Sul (8.832,2); Minas Gerais (7.590,5); Bahia (6.940,7).

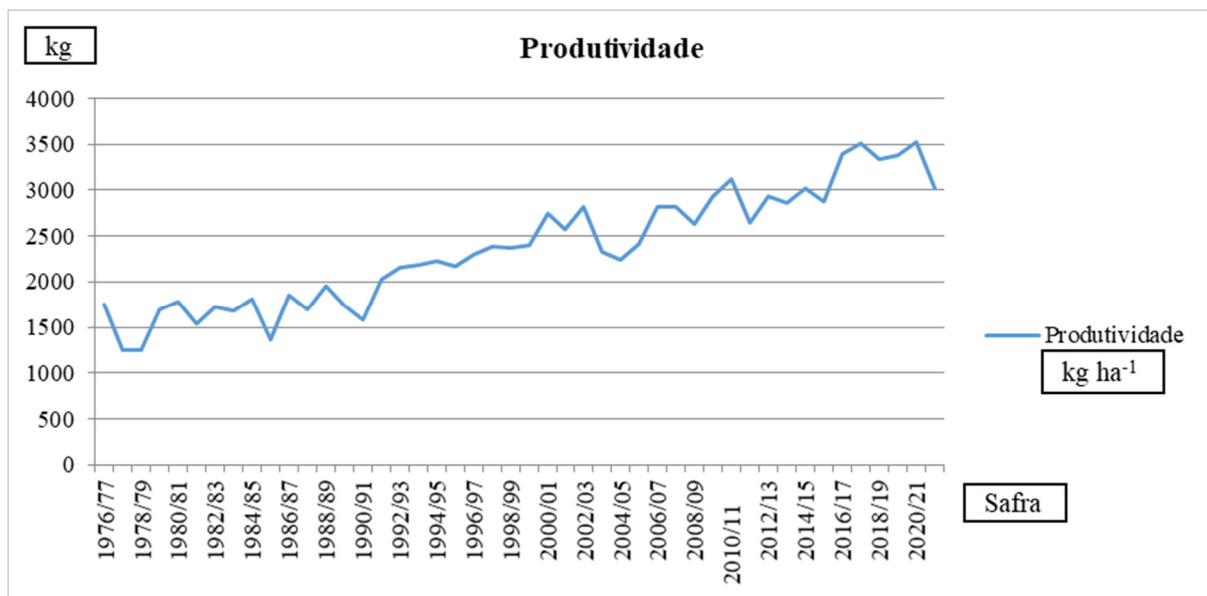


Figura 2. Produtividade da soja no Brasil (CONAB, 2023).

Destaca-se que as maiores produtividades estimadas na safra 2021/2022, em kg ha⁻¹, são: Goiás (3.958), Bahia (3.901), São Paulo (3.850), Minas Gerais (3.828), Distrito Federal (3.720), respectivamente (Figura 03).

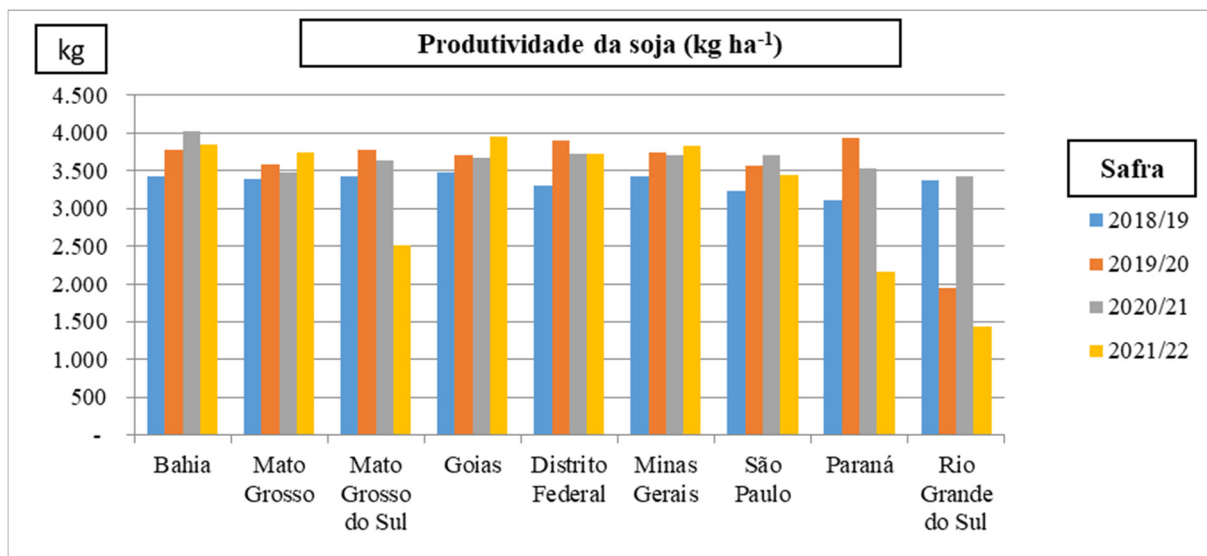


Figura 3. Produtividade da soja nos principais estados produtores (CONAB, 2023).

2.2 Fixação Biológica de Nitrogênio pela Soja

A atmosfera é composta por 78% de nitrogênio (N), porém, apesar de estar presente em quantidades elevadas na atmosfera, a escassez de nitrogênio no solo é frequentemente relatada como principal fator limitante do crescimento das plantas (SILVA et al., 2007).

O nitrogênio (N) faz parte da constituição dos ácidos nucleicos (DNA, RNA) e de compostos bioquímicos nas células vegetais, como aminoácidos, proteínas. É o nutriente requerido em maior quantidade pelas plantas (HUNGRIA; CAMPO; MENDES, 2007). De acordo com esses pesquisadores, devido ao elevado teor de proteínas nos grãos da soja, a

demanda em N é alta, sendo estimada em cerca de 80 kg de N para cada 1.000 kg de grãos produzidos.

A fixação biológica de nitrogênio, a matéria orgânica do solo e os fertilizantes nitrogenados, são as principais fontes de nitrogênio para a soja (BAGALE, 2021).

A fixação industrial do nitrogênio é realizada através de um processo denominado de Haber-Bosch, que funciona a uma temperatura de 300 a 600°C, com uma pressão de 200 a 800 atm, utilizando a energia fóssil do petróleo (HUNGRIA, CAMPO; MENDES, 2007). Este processo de fixação do N representa um custo elevado (DÖBEREINER, 1990). Por outro lado, a fixação biológica do nitrogênio (FBN), requer apenas uma fonte de energia renovável, que é a energia do sol.

Os solos brasileiros apresentam deficiência de N, com a capacidade de oferecer apenas 15 a 30 kg ha⁻¹ para a cultura da soja (HUNGRIA et al., 2006). De acordo com estes autores, devido ao elevado custo dos fertilizantes nitrogenados no Brasil, deu-se uma maior ênfase na fixação biológica de nitrogênio (FBN), com programas para a seleção de linhagens de rizóbios e melhoramento de cultivares de plantas com desempenho simbiótico superior (HUNGRIA et al., 2006). A inoculação da soja com *Bradyrhizobium* spp. pode suprir plenamente a demanda de N da cultura, sem a necessidade do uso de adubos ricos em nitrogênio (SANTOS; NOGUEIRA; HUNGRIA, 2019).

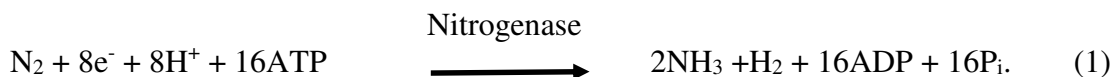
A cultura da soja obtém todas as suas necessidades de N, por meio do processo de FBN (HUNGRIA et al., 2005), reduzindo os custos de produção e tornando essa oleaginosa mais competitiva no mercado internacional (ZILLI et al., 2010).

Segundo Ferreira et al. (2000) as bactérias fixadoras de nitrogênio, presentes nos nódulos radiculares são um dos mais importantes organismos benéficos do solo, destacando sua importância como componente para manutenção da qualidade do solo.

A associação simbiótica entre rizóbios e plantas da família das leguminosas (Fabáceas), promove a fixação biológica de nitrogênio (FERGUSON et al., 2010). De acordo com os pesquisadores os rizóbios penetram nas raízes dessas plantas e com isso ocorre a formação de estruturas radiculares especializadas, denominadas de nódulos, local onde as bactérias se diferenciam em bacterióides.

A fixação biológica do nitrogênio pelos rizóbios, em nódulos de raízes de leguminosas, é realizada através do complexo enzimático denominado de nitrogenase, conforme reação química abaixo (LIU et al., 2018).

A estequiometria da reação de redução do nitrogênio atmosférico (N₂) à amônia (NH₃) é apresentada na equação (1):



A capacidade de redução do nitrogênio (N₂) da atmosfera à amônia (NH₃) (LIU et al., 2018), é restrita a alguns procariotos, como por exemplo, as bactérias do gênero *Bradyrhizobium*, que possuem a capacidade de quebrar a ligação tripla do nitrogênio (N≡N) da atmosfera, através da ação da enzima nitrogenase que é a responsável pelo processo de FBN (SOTO-URZÚA; BACA, 2001).

A formação do nódulo radicular e a fixação biológica do nitrogênio dependem das características do solo (físicas, químicas e biológicas) e também das condições climáticas (temperatura, umidade, precipitação) (BAGALE, 2021).

Mais recentemente as atenções têm sido voltadas para a utilização de bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCP), principalmente bactérias do gênero *Azospirillum* mais conhecidos e estudados, principalmente, no Brasil (SANTOS; NOGUEIRA; HUNGRIA, 2021).

Um grupo de microrganismos benéficos às plantas, vivendo livremente no solo ou habitando a superfície radicular (rizosfera e filosfera) e / ou o interior dos tecidos (endófitas) de plantas hospedeiras (LASTOCHKINA et al., 2021). As bactérias endofíticas se ligam às superfícies das raízes, sem uma especificidade na ligação, entrando na planta pelas feridas de tecidos, estômatos, lenticelas, rachaduras (GLICK, 2016). Este pesquisador destaca outro grupo de bactéria, os rizóbios, que se ligam e infectam um número limitado de plantas de forma específica (possuem uma especificidade de ligação).

As BPCP podem afetar direta ou indiretamente o crescimento e o desenvolvimento das plantas (SANTOS; NOGUEIRA; HUNGRIA, 2021). A promoção direta do crescimento das plantas ocorre quando a bactéria facilita a absorção de nutrientes essenciais (SANTOYO; GAMALERO; GLICK, 2021). Isso pode ocorrer através da fixação biológica de nitrogênio e solubilização de fósforo do solo (BABALOLA, 2010). Já, a promoção indireta do crescimento das plantas, ocorre quando uma dessas bactérias previne, ou pelo menos diminui, os danos a uma planta causados por fitopatógenos, como fungos, nematóides e outras bactérias que não são BPCP (GLICK; GAMALERO, 2021).

As cepas de *Azospirillum brasilense* Ab-V5 e Ab-V6 demonstraram ser eficientes como inoculantes, principalmente, para as culturas de grãos, como por exemplo a soja, onde o inoculante é utilizado em co-inoculação com o *Bradyrhizobium* (SANTOS; NOGUEIRA; HUNGRIA, 2021).

2.3 Inoculantes

Os inoculantes são produtos compostos por microrganismos vivos que contribuem com o desenvolvimento de diferentes espécies vegetais (BRASIL, 2011).

Os rizóbios são os organismos mais utilizados como inoculantes, sendo capazes de colonizar a rizosfera e estabelecer nódulos nas raízes de suas plantas hospedeiras das espécies da família Fabaceae (SANTOS; NOGUEIRA; HUNGRIA, 2019).

A pesquisadora Döbereiner (1990) afirmava que o sucesso da soja no Brasil se deve a um programa de melhoramento genético orientado à obtenção de cultivares com alta produção sem adubação nitrogenada e ao desenvolvimento de inoculantes contendo rizóbios adaptados aos solos brasileiros.

Há dois tipos de inoculantes comercializados no Brasil, os turfosos e os líquidos Santos, Nogueira e Hungria (2019). Estes pesquisadores relatam que na safra brasileira de soja de 2018/2019 foram comercializados mais de 70 milhões de doses de inoculantes. De acordo com a Associação Nacional dos Produtores e Importadores de Inoculantes (CASTRO, 2020) 70 % dos inoculantes comercializados foram líquidos e o percentual de agricultores que utilizou inoculantes na soja, foram 70 % em 2016, 78 % em 2017 e 82 % em 2018. Para esta entidade, o uso da coinoculação (*Bradyrhizobium* + *Azospirillum*) cresceu de 1 % em 2017 para aproximadamente 14 % em 2018.

Segundo estimativas, as doses de inoculantes comercializadas na safra brasileira de 2020/2021 foram 87 % de *Bradyrhizobium* spp. para a cultura da soja. E das 12,4% doses de *Azospirillum brasilense* comercializadas, mais de 80% também foram destinados à soja, em coinoculação (HUNGRIA; NOGUEIRA, 2022).

De acordo com o Ministério da agricultura pecuária e abastecimento (BRASIL, 2011), são quatro linhagens de *Bradyrhizobium* que estão autorizadas para a produção de inoculantes de soja no país (*Bradyrhizobium japonicum* SEMIA 5079 (= CPAC 15), *B. diazoefficiens* SEMIA 5080 (= CPAC 7), *B. elkanii* SEMIA 5019 (= BR 29) e SEMIA 587).

2.4 Correção do Solo

O pH mede a acidez ativa do solo (atividade de íons hidrogênio na solução do solo). A redução do pH do solo, além de diminuir a disponibilidade de nutrientes, também provoca um aumento na solubilidade de Al^{3+} , que é considerado tóxico às plantas (PREZOTTI; MARTINS, 2013). O pH do solo é o principal fator que determina a disponibilidade de nutrientes para as plantas, as deficiências ou toxidades e também determina sobre a necessidade de calagem (FAGERIA; ZIMMERMANN, 1998). Estes autores destacam que o pH 7 é considerado como sendo neutro, e acima deste valor os solos são alcalinos e abaixo são ácidos. Cabe destacar, que o pH do solo nem sempre representa o pH na rizosfera onde os nutrientes são absorvidos pela planta (HARTEMINK; BARROW, 2023).

Segundo Junior et al. (2020), o intervalo de pH (determinado em água) para a cultura da soja, que possibilita um melhor aproveitamento dos nutrientes do solo (Figura 4), varia de 6,0 a 6,8. Estes autores destacam que a correção do solo é feita através da calagem, e esta deve ser realizada a partir da interpretação dos resultados da análise química do solo. Há duas formas de calagem: superficial e incorporada ao solo.

Com a calagem, ocorre a elevação do pH do solo e com isso a forma de alumínio tóxica (Al^{3+}) fica neutralizada pelas hidroxilas provenientes das reações do calcário no solo, formando um complexo insolúvel ($\text{Al}(\text{OH})_3$) e inofensivo para as raízes das plantas (SOBRAL et al., 2015). Em solos ácidos a solubilidade do Al^{3+} é alta e provoca danos às raízes das plantas (PREZOTTI; MARTINS, 2013). Estes autores ainda destacam que em pH inferior a 5,5 não ocorre a presença de alumínio no solo, na forma de Al^{3+} . Corrobora para esta informação, o trabalho de Baquy et al. (2018), que observaram concentrações de Al^{3+} próximas de zero, em pH do solo igual a 5,5.

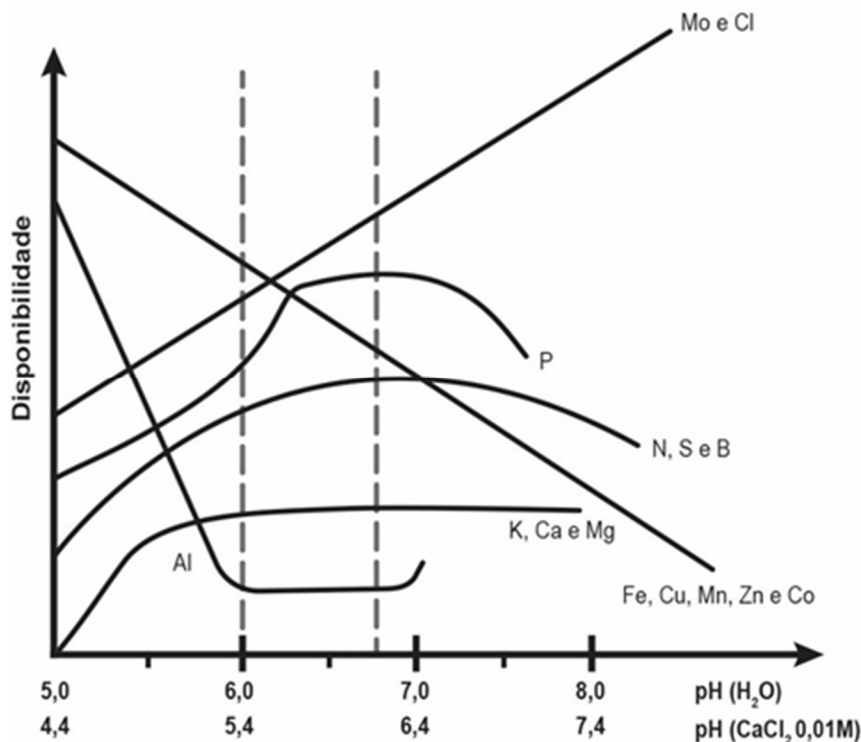


Figura 4. Relação entre a disponibilidade de nutrientes e pH do solo. Fonte: (MALAVOLTA, 1979).

Em relação à Figura 4, o diagrama demonstra a relação do pH do solo com os nutrientes das plantas em que a faixa de pH de 6,0 a 6,8 indica apenas a disponibilidade relativa do nutriente, não representando a quantidade real, a qual é influenciada pelo tipo de cultura, solo, adubação, região climática (HARTEMINK; BARROW, 2023). Estes autores destacam que na faixa de pH mais favorável à disponibilidade de nutrientes não significa um suprimento satisfatório, mas apenas indica que as condições são favoráveis em relação à reação do solo.

A acidez dos solos pode limitar o crescimento das plantas por vários fatores químicos, dentre os quais se podem destacar os seguintes: aumento da concentração de íons H^+ na solução, aumento da concentração de alumínio (Al^{3+}), aumento da concentração de manganês (Mn^{2+}), diminuição da concentração de cálcio (Ca^{2+}), diminuição da concentração de magnésio (Mg^{2+}), diminuição da concentração de potássio (K^+), diminuição na solubilidade de fósforo (P) e molibdênio (Mo), provocando a deficiência desses nutrientes (MARSCHNER, 1991).

A concentração de íons H^+ , a toxidez de Al^{3+} e Mn^{2+} a deficiência de Ca^{2+} , Mo e P podem contribuir de forma negativa para a nodulação e fixação biológica de nitrogênio na cultura da soja (GRAHAM, 1992). A toxidez provocada pelo Al^{3+} , normalmente, se apresenta em solos com pH menor que 5,5 (pH em solução aquosa) (EEKHOUT; LARSEN; DE VEYLDER, 2017). De acordo com estes autores, o Al^{3+} em baixas concentrações (micromolares), pode provocar a inibição do crescimento radicular e a redução na absorção de nutrientes.

A principal diferença entre o plantio direto e o sistema convencional se dá em relação ao manejo do solo. No primeiro não há o revolvimento do solo, permanecendo a área coberta com os restos vegetais da cultura anterior ou por vegetação cultivada, sendo a calagem realizada sobre a superfície do solo (RHEINHEIMER et al., 2000a; GATIBONI et al., 2003).

Por outro lado, no sistema convencional a correção da acidez do solo é realizada por meio da incorporação do calcário com arações e gradagens (GATIBONI et al., 2003). Cabe destacar que em ambos os sistemas de cultivo é necessário a adição de insumos, em especial o calcário, visto que os solos agrícolas brasileiros, em sua maior parte, são ácidos, necessitando de correção (RHEINHEIMER et al., 2000a). E, ainda de acordo com esses pesquisadores, os solos com pastagens naturais, normalmente, apresentam elevada acidez e presença de alumínio, em quantidades prejudiciais às plantas.

Em relação à região do cerrado brasileiro, o excesso de Al^{3+} e a deficiência de Ca^{2+} , principalmente em profundidade, comprometem o crescimento das raízes das plantas e como consequência a produção das culturas, especialmente se estas passarem por veranicos (SOUSA; LOBATO; MIRANDA, 1996). Estes autores ainda relatam que a calagem permite um melhor desenvolvimento do sistema radicular das plantas, contribuindo para melhorar a absorção de nutrientes e água.

Em um trabalho de campo conduzido na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, solo Argissolo, Alves et al. (2021) avaliaram as safras de soja 2017/2018 e 2018/2019 e observaram que a calagem aumentou o número e a massa seca de nódulos por planta e também aumentou a produtividade de grãos, comparando com a área sem calagem. Os autores ainda constataram que o principal benefício da calagem foi a redução da toxidez provocada pelo Al^{3+} e o aumento do pH do solo. E como consequência desse efeito, houve um aumento da FBN. Graham (1992) relatou a necessidade de um aumento da concentração do cálcio para favorecer a nodulação, quando o pH do solo apresenta valores considerados baixos.

No plantio direto, apesar de haver uma pequena mobilização do calcário na linha de plantio, a sua movimentação descendente tende a não ocorrer além da profundidade de semeadura (RHEINHEIMER et al., 2000a). De outra forma, no plantio convencional com o revolvimento do solo por meio da aração e gradagens, ocorre a dissolução da acidez originada pelos fertilizantes em toda a camada arável (CIOTTA et al., 2002).

A aplicação superficial de calcário em sistema de plantio direto é uma prática frequentemente utilizada no Sul do Brasil (PETRERE; ANGHINONI, 2001). A calagem realizada em plantio direto ocorre na superfície do solo e os corretivos de acidez utilizados na agricultura são pouco solúveis, apresentando baixa mobilidade, restringindo-se sua ação às camadas superficiais do solo. Portanto, as alterações promovidas pela correção da acidez nas características químicas do solo em plantio direto são complexas (CAIRES et al., 1999), havendo incertezas em relação aos critérios referentes às doses e à frequência de reaplicação do calcário (GATIBONI et al., 2003).

Num experimento conduzido na Universidade Federal de Santa Maria (RS), durante os anos de 1994 a 2001, em um Argissolo Vermelho Distrófico arênico, constatou-se que a aplicação superficial de calcário neutraliza totalmente o alumínio trocável apenas até 6 cm de profundidade (GATIBONI et al., 2003). Em outro estudo na região sul do Brasil, foi observado que os atributos relacionados à acidez ao longo do perfil do solo foram diferentes ao incorporarem o calcário ao solo, na profundidade de 12 a 15 cm, dose recomendada para elevar o pH para 6, no início do sistema de plantio direto, comparativamente a calagem superficial, mesmo 18 anos de cultivo sem revolvimento (DOS SANTOS et al., 2018). Relataram ainda que mesmo com a aplicação da dose recomendada na superfície do solo (calagem superficial), nas condições experimentais, houve um avanço muito lento da frente de neutralização, insuficiente para neutralizar todo o Alumínio trocável (Al^{3+}) presente no solo. Assim, os autores concluíram que para a produção de grãos em sistema de plantio direto, a calagem aplicada na dose recomendada e incorporação ao solo, condiciona o solo de forma mais favorável ao crescimento radicular do que quando empregada a calagem superficial.

A concentração de Al^{3+} na solução do solo pode provocar a inibição da absorção e transporte de Ca^{2+} e água para a parte aérea e essa inibição pode ser compensada pelo aumento de raízes laterais, estimuladas pelo Al^{3+} . Como consequência a planta teria mais locais para absorção de Ca (MARSCHNER, 1991). Este autor destaca que as baixas concentrações de Ca^{2+} na solução do solo, associada com elevadas concentrações de H^+ e concentrações tóxicas de Al^{3+} , são os principais fatores responsáveis pela inibição do crescimento radicular. Ele ainda relata que o aumento da concentração de Al^{3+} na solução do solo, aumenta a necessidade de mais Ca^{2+} para manter o alongamento da raiz. Segundo Delhaize e Ryan (1995) a toxidez por Al^{3+} limita a produção da planta em solos ácidos pela inibição do crescimento radicular, principalmente na região do ápice da raiz. Além disso, o Al^{3+} em concentração elevada, além de ser tóxico às plantas, pode interferir na disponibilidade de fósforo, ao reagir com fosfatos no solo, formando um complexo pouco solúvel que é o fosfato de alumínio (VIVIANI et al., 2010).

Ainda, de acordo com Marschner (1991) o aumento da acidificação do solo inibe a penetração da raiz no subsolo, como consequência o sistema radicular apresenta-se mais raso.

Yu et al. (2011) observaram mudanças morfológicas e fisiológicas das plantas de soja em situação de estresse causado pela elevada concentração de Al^{3+} na solução. A toxidez causada pelo Al^{3+} é maior durante os períodos de seca e o controle da acidez do solo pela aplicação de calcário é um fator essencial para melhorar o crescimento das raízes em períodos de déficit hídrico (JORIS et al., 2013). De acordo com estes autores, a absorção de N do solo pode ser afetada pela limitação no crescimento radicular, diante da elevada acidez do solo sob estresse hídrico. E ainda relatam que em condições de pH mais elevado, pode haver uma melhor fixação biológica de N pela cultura da soja, na ocorrência de um estresse hídrico. A cultura da soja é sensível ao solo ácido (REIS et al., 2018).

A incorporação de calcário ao solo é mais eficiente em diminuir os efeitos da toxidez do Al^{3+} às raízes que crescem no solo, nas camadas mais profundas do perfil, em comparação com a calagem superficial (SANTOS et al., 2018).

Em um experimento realizado na região sul do Brasil, a incorporação do calcário ao solo, através da aração e gradagens, precedendo o sistema plantio direto, foi mais eficiente em

controlar a acidez e promover modificações nos atributos químicos do solo em profundidades, comparado à calagem superficial (KAMINSKI et al., 2005). Estes autores ainda relataram que o efeito da incorporação do calcário, normalmente, ocorre a uma profundidade que raramente ultrapassa os 10 cm, nas condições do sul do Brasil. Segundo estes pesquisadores, este fato se deve às dificuldades de incorporação do calcário ao solo.

2.5 Gessagem

A aplicação do gesso agrícola diminui a saturação por Al^{3+} nas camadas do solo abaixo de 20 cm, onde normalmente não é possível realizar a incorporação do calcário (STREDO, 2008). De acordo com este autor, o gesso deve ser utilizado quando os resultados da análise do solo, na profundidade de 20 a 40 cm indicar saturação por Al^{3+} superior a 20 % ou quando os teores de Ca^{2+} forem inferiores a $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

O gesso agrícola, devido à sua elevada solubilidade e mobilidade, facilita o aprofundamento das raízes no solo, tornando as plantas mais tolerantes aos veranicos, principalmente quando ocorrem em solos arenosos. Além disso, a prática da gessagem aumenta a eficiência das plantas na utilização dos nutrientes (KAMINSKI et al., 2005). De acordo com este autor, valores de saturação do solo por alumínio acima de 10% é considerado como sendo prejudicial ao crescimento radicular das plantas. Ele ainda relata que na região do cerrado, a maior parte da área agricultável, apresenta valores para a saturação por alumínio superior a este índice. A acidez do subsolo interfere no crescimento de raízes e conseqüentemente na absorção de água e nutrientes pelas plantas (QUAGGIO et al., 1993).

Parte significativa dos solos do Brasil apresentam problemas relacionados à acidez subsuperficial, haja vista que a incorporação do calcário, nas camadas profundas do solo, raramente é possível nas lavouras comerciais (RAMPIM et al., 2011). De acordo com estes autores, as modificações nos atributos químicos do solo, como a neutralização do Al^{3+} , observadas com a utilização de gesso agrícola, podem trazer benefícios para espécies vegetais. Eles ainda observaram, em um estudo realizado em sistema de plantio direto com a cultura da soja e do trigo, em Guaíra (PR), em um Latossolo Vermelho Eutroférico textura muito argilosa, que a gessagem promoveu a redução de Al^{3+} e um aumento nos teores de Ca em todas as camadas do solo avaliadas (0-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm). Constataram ainda, um aumento nos teores foliares de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , na cultura da soja. Em outro trabalho, realizado em sistema de plantio direto, em Ponta Grossa (PR), num Latossolo Vermelho-Escuro distrófico de textura média, com as culturas de milho, trigo e soja, em sistema de plantio direto, observaram uma redução nos teores de Al^{3+} nas profundidades do solo (20-40, 40-60 e 60-80 cm), após 14 meses (CAIRES et al., 1999). Além disso, constataram um aumento nos teores de Ca^{2+} em todo o perfil do solo e elevação do pH no subsolo (20-40, 40-60 e 60-80 cm). Este efeito foi observado aos 14 e 36 meses da aplicação de gesso no solo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da Área Experimental

O experimento foi conduzido na safra 2021/2022 em área da fazenda Abadia localizada no município de Campos dos Goytacazes, Estado do Rio de Janeiro, apresentando coordenadas geográficas 21°43'84" S e 41°12'63" W, altitude média em relação ao nível do mar de 11 m.

De acordo com dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2022), no município de Campos dos Goytacazes, a temperatura máxima (média de 31,2 °C) e temperaturas mínimas (média de 21,5 °C) e amplitude térmica no período dos experimentos próximo a 10 °C. Os dados da precipitação pluviométrica acumulada, por decêndio durante o desenvolvimento do experimento, estão representados na Tabela 1.

Tabela 1. Pluviosidade acumulada por decêndio (INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2022) para o município de Campos dos Goytacazes-RJ.

Meses do ano	Dias do mês		
	1 a 10	11 a 20	21 a 30
	Precipitação (mm)		
Outubro	35	196	74
Novembro	0	40	74
Dezembro	13	75	0
Janeiro	155	0	18
Fevereiro	138	60	22
Março	0	0	22
Abril	36	30	0

A área do experimento fora cultivada no passado com a cultura da cana de açúcar e nos últimos 10 – 15 anos como pastagem para bovinos. Havia diversas gramíneas como cobertura do solo, principalmente a *Brachiaria* spp. O solo predominante da área experimental foi classificado como Neossolo Flúvico Tb Distrófico típico, textura médio-arenosa (SANTOS et al., 2018).

3.2 Delineamento Experimental e Tratamento

O solo da área experimental foi inicialmente preparado no ano de 2020. Naquela safra o solo foi analisado quanto à fertilidade e textura (Tabela 2). Também foi aberta uma trincheira para classificação, identificando-se o solo como Neossolo Flúvico Tb Distrófico típico, textura média/arenosa (SANTOS et al., 2018).

Ainda no ano de 2020, a área foi dividida em dois talhões, com dimensões de aproximadamente 70 x 70 m. Cerca de 90 dias antes da semeadura da soja, o primeiro talhão foi gradeado até a profundidade de cerca de 20 cm para o revolvimento do solo, seguindo-se da aplicação à lanço de 1 tonelada de calcário dolomítico + 0,5 t ha⁻¹ de gesso, e de uma nova gradagem na mesma profundidade. No segundo talhão, também aproximadamente 90 dias da semeadura da soja, aplicou-se a mesma quantidade de calcário e gesso, também a lanço, porém não realizou qualquer revolvimento do solo.

A prática de calagem e gessagem foram realizadas de acordo com a necessidade de correção do solo para a cultura, seguindo as orientações do Manual de Calagem e Adubação do Estado do Rio de Janeiro (FREIRE et al., 2013). O calcário utilizado na calagem apresentou as seguintes características: CaO (óxido de cálcio) igual a 30%, MgO (óxido de magnésio) igual a 10% e PRNT igual a 76%. Posteriormente, semeou-se *Brachiaria ruziziensis* e realizou-se uma gradagem leve para a incorporação das sementes em ambos os talhões.

No início do mês de outubro de 2020 foi feita dessecção com glifosato na vegetação em ambos os talhões e na última quinzena deste mês procedeu-se a semeadura da soja. As sementes da soja foram inoculadas com estirpes de *Bradyrhizobium* recomendadas. Na adubação de plantio aplicou-se a mistura de 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 80 kg ha⁻¹ de K₂O e 50 kg ha⁻¹ de FTE BR-12, como fontes o superfosfato simples, cloreto de potássio, respectivamente.

Após a colheita da soja em março/abril, os resíduos culturais permaneceram sobre o solo e em maio realizou-se a semeadura de *Brachiaria ruziziensis* em ambos os talhões, seguindo de uma gradagem leve para a incorporação das sementes. O manejo da cultura foi realizado de acordo com as recomendações de Junior et al (2020).

Tabela 2. Caracterização química e granulometria do solo antes da implantação do experimento da safra 2019/2020 na área da fazenda Abadia no Norte Fluminense.

Profundidade (cm)	P	K	Ca	Mg	Na	Al	H + Al	pH	
	---mg dm ⁻³ ---		-----cmol _c dm ⁻³ -----						
0 a 20	5	43	1,5	0,6	0,08	0,5	3,1	4,6	
0 a 40	4	23,46	1,1	0,4	0,07	1	4,8	4,6	
Profundidade (cm)	MO	SB	CTC	V	m	Cu	Fe	Mn	Zn
	%	---cmol _c dm ⁻³ ---		----%----		-----mg dm ⁻³ -----			
0 a 20	1,74	2,3	5,47	43	18	1,01	189,5	1,39	14
0 a 40	1,17	1,65	6,46	26	37	1,02	194,8	0,51	5,22
Profundidade (cm)	Análise granulométrica								
	-----%-----								
	Areia			Silte			Argila		
0 a 20	75			13			12		
0 a 40	73			8			19		

Para fins deste estudo foi considerado o experimento conduzido na safra 2021/2022, muito embora como mencionado anteriormente o preparo inicial da área tenha se dado na safra anterior. O experimento foi implantado considerando os dois talhões preparados na safra anterior, ou seja, ocorrendo a comparação das duas formas de calagem, com aplicação do calcário em superfície e incorporada ao solo. No mês de maio de 2021 foi realizada a semeadura de *B. ruziziensis*, cujas sementes foram incorporadas com uma gradagem leve em ambas as áreas. No início de outubro de 2021, devido ao intenso crescimento da *B. ruziziensis*, sobretudo na área com calcário incorporado, foi liberado o pastejo bovino por 2 dias. Em seguida, o capim foi dessecado com glifosato (2 L ha⁻¹).

Para fins de mecanização, o experimento foi implantado com a semeadura das cultivares de soja em faixas, com dimensões de 70 m x 3 m (comprimento e largura respectivamente). O espaçamento utilizado entre linhas foi de 0,50m, totalizando 6 linhas para cada cultivar. Cada cultivar foi semeada nos dois talhões.

A soja foi semeada mecanicamente utilizando-se semeadeira tratorizada, na profundidade de 3 a 5 cm, em 26 de outubro de 2021, repetindo-se a adubação da safra anterior.

A densidade de semeadura variou entre 240 mil a 320 mil sementes por hectare, de acordo com a recomendação para cada cultivar. A semeadura foi realizada na condição de sequeiro, a partir das primeiras chuvas do mês de outubro.

3.3 Inoculação da Semente

Antes do plantio foi feita inoculação das sementes da soja com inoculantes contendo duas estirpes de *Bradyrhizobium* recomendadas para a soja. Foram utilizadas no experimento cerca de seis a sete doses de inoculantes por ha, o que proporciona uma concentração de células na ordem de 1,5 a 2 milhões de Unidades Formadoras de Colônias por semente de soja. Adicionalmente foi aplicada uma dose de 100 mL ha⁻¹ de *Azospirillum*, seguindo a recomendação do fabricante.

3.4 Cultivares de Soja

Foram utilizadas no experimento 5 cultivares de soja transgênicas: BRS 5980 IPRO; BRS 8980 IPRO; BRS 7981 IPRO; 95R95 IPRO; M 5917 IPRO. Estes materiais foram adquiridos comercialmente com a finalidade do plantio do experimento e em especial a semente da cultivar 95R95 IPRO que já se encontrava tratada com fungicida industrialmente.

A cultivar BRS 8980 IPRO não completou o ciclo de produção dentro do período em que foi feita a avaliação de produção de grãos. Portanto ela não apresentou boa adaptação às condições edafoclimáticas da região Norte Fluminense, não fazendo parte da avaliação.

3.4.1 Características das cultivares de soja

Tabela 2. Principais características das cultivares de soja, utilizadas no experimento, na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.

Cultivar	Marca	Grupo de maturidade	Hábito de crescimento	Exigência em fertilidade	Região edafoclimática	População (Mil plantas/ha)	Ciclo (dias)
BRS 5980 IPRO	Embrapa	5.9	Indeterminado	Média/Alta	301, 303, 304, 401	340 a 420	98 a 107
BRS 7981 IPRO	Embrapa	7.9	Determinado	-	401	250 a 350	115 a 125
95R95 IPRO	Pioneer	5.9	Indeterminado	Alta	101, 102, 103, 104, 201, 202, 203, 204	340 a 400	105 a 125
5917 IPRO	Monsoy	5.9	Indeterminado	Média/Alta	201, 202, 204	280 a 300	112 a 126

Fonte: Centro Sul Especialista em Sementes (2021) e Portal Embrapa (2023).

3.5 Caracterização Química do Solo

3.5.1 Coleta de solo na linha e entrelinha de plantio da soja

Na fase vegetativa da cultura da soja, antes do início do florescimento foram coletadas amostras de solo para análise química.

Realizou-se amostragens na faixa cultivada com a BRS 5980 IPRO. As amostragens foram realizadas entre as plantas na linha de plantio (2ª linha) e entrelinhas (2ª e 3ª linha de plantio), em ambos os talhões.

As amostras de solo foram coletadas em 03 pontos diferentes ao longo das linhas de plantio a cerca de 15 a 20 m equidistantes, nas profundidades de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-40 cm. Logo em seguida, as amostras de solo foram secas ao ar e em seguida destorroadas, peneiradas em uma malha de 2 mm, identificadas e enviadas ao laboratório, para a determinação dos teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , P, pH (água), Al^{3+} , acidez potencial ($\text{H} + \text{Al}^{3+}$). Para a determinação do carbono essas amostras de solo passaram por uma moagem em moinho rolador com frasco de vidro contendo peça metálica com formato hexagonal.

As análises químicas do solo e planta foram realizadas de acordo com a metodologia da Embrapa (SILVA et al., 2009), conforme descrição resumida a seguir: Ca^{2+} , Mg^{2+} foram analisados por absorção atômica; P, K^+ extraídos com solução Mehlich 1, sendo (P) quantificados por colorimetria e o K^+ por fotometria de emissão de chama. O carbono orgânico determinado por oxidação a quente com dicromato de potássio e titulação com sulfato ferroso amoniacal. O Al^{3+} e o $\text{H} + \text{Al}$ avaliados através de titulação L^{-1} e o pH do solo foi determinado em água por potenciometria. O teor de N foi determinado por combustão através do analisador elementar C-H-N. Cabe destacar que as análises químicas do solo foram realizadas nos laboratórios da Embrapa Agrobiologia.

3.6 Caracterização Agronômica da Soja

3.6.1 Coleta da parte aérea e de raízes com os nódulos

No mesmo dia (15/12/2021) da coleta de amostras de solo para análise química, foram realizadas coletas de raízes e da parte aérea, na segunda linha de plantio para cada cultivar, sendo cinco repetições, cada uma com cinco plantas equidistante a 10-12 m de cada uma. Para a coleta da parte aérea, as plantas foram seccionadas na altura do nó cotiledonar, com posterior acondicionamento em sacos de papel. Por outro lado, a coleta para a determinação do número e massa seca de nódulos, e a massa seca de raízes, foi utilizada uma pá reta a qual foi introduzida no solo à uma distância de cerca de 20 cm das plantas e a 25 cm de profundidade. Posteriormente as raízes foram lavadas em água corrente sobre uma malha de 2 mm de diâmetro. Os nódulos foram destacados das raízes, sendo raízes e nódulos acondicionados em sacos de papel. Posteriormente, raízes, nódulos e parte aérea das plantas foram levados a estufa para secagem, à uma temperatura de 65° C por um período de 72 h. Após isso, foi determinado o número de nódulos, a massa de nódulos secos, massa seca de raízes e da parte aérea.

No dia 11/01/2022 foram coletadas somente raízes para avaliação. Cabe destacar que foram analisadas as raízes de cinco plantas de cada cultivar para determinação do comprimento da raiz principal, número de raízes secundárias e o volume de raízes pelo método da proveta.

3.6.2 Altura de planta e inserção da primeira vagem

As alturas de planta e de inserção da primeira vagem foram determinadas no momento da colheita medindo-se, ao acaso, 10 plantas por parcela. A altura de planta foi obtida medindo-se a distância entre o nível do solo até o ápice do caule e a altura de inserção da primeira vagem foi determinada pela distância entre o nível do solo e a inserção da primeira vagem no caule.

3.6.3 Componentes de produção

Foram coletadas no campo 5 plantas com as vagens secas, de cada cultivar, ao acaso, e 4 repetições, para determinação do número de vagens, número de grãos de 30 vagens, comprimento de 10 vagens e a massa de grãos de 30 vagens. Medições realizadas para cada

uma das repetições. Também foi determinado o diâmetro na base do caule para cada uma das plantas analisadas.

3.6.4 Produtividade da soja

Foram amostradas as duas linhas centrais de cada parcela de cada cultivar em três metros de comprimento, desprezando-se assim as bordaduras, representando uma área útil de 3,0 m². Foram realizadas quatro amostragens (4 repetições) para cada uma das cultivares. Após a debulha e limpeza dos grãos das plantas colhidas dentro da área útil, a produtividade foi estimada em balança de precisão com 4 casas decimais e os valores expressos em kg ha⁻¹, corrigindo-se o grau de umidade para 13%.

3.6.5 Medições e observações no campo

Tabela 3. Características de cultivares na área da calagem incorporada, em experimento para comparação de formas de calagem em solo cultivado com soja na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.

Cultivar	Cor da flor	R1 em	Ciclo (dias) DAE	Altura em R8 (cm)	Altura inserção 1ª vagem (cm)	Estande final (pl/ha)	Acamamento
M 5917	Roxa	12 dez 21	110	68,9	9,8	195.000	1
BRS 5980 IPRO	Branca	10 dez 21	113	79,0	11	198.000	1
BRS 7981 IPRO	Roxa	27 dez 21	134	95,8	12,3	163.000	2
95R95	Roxa	12 dez 21	110	71,3	9,5	163.000	1

Tabela 4. Características das cultivares na área da calagem superficial, em experimento para comparação de formas de calagem em solo cultivado com soja na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.

Cultivar	Cor da flor	R1 em	Ciclo (dias) DAE	Altura em R8 (cm)	Altura inserção 1ª vagem (cm)	Estande final (pl/ha)	Acamamento
M 5917	Roxa	12 dez 21	110	59,5	5,58	103.000	1
BRS 5980 IPRO	Branca	10 dez 21	113	55	6,42	145.000	1
BRS 7981 IPRO	Roxa	27 dez 21	134	73,2	7,47	135.000	1
95R95	Roxa	12 dez 21	110	58,1	7,7	226.000	1

3.7 Análise Estatística

Os dados coletados foram submetidos ao teste de homocedasticidade (teste de Bartlett) e de normalidade (teste de Shapiro-Wilk). Quando os dados apresentaram anormalidade, foi feita uma transformação, usando a equação Raiz quadrada de $Y + 1.0 - \text{SQRT}(Y + 1.0)$. Posteriormente realizou-se a análise de variância através do teste F (Fischer), e as médias, quando diferiram significativamente, foram comparadas pelo teste Tukey a 5 % de probabilidade ($p \leq 0,05$). As análises foram executadas por meio do programa computacional Sistema para Análise de Variância – SISVAR 5.6. A análise foi realizada considerando um fatorial quatro cultivares e duas formas de calagem.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Fertilidade do Solo

A análise de variância indicou que houve interação entre os fatores (posição de amostragem e profundidade de amostragem) para o teor de Ca^{+2} (Tabela 6). Entretanto observou-se diferença significativa, apenas na camada de 0 a 10 cm. Observou-se ainda diferença significativa em relação à forma de calagem, tendo o tratamento incorporado apresentado a maior média para o teor de Ca^{+2} ($1,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), em comparação com a calagem superficial ($\text{Ca}^{+2} = 0,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Ao analisar o efeito isolado da calagem, constatou-se que o valor médio encontrado para a calagem incorporada e, também para a calagem superficial, foram considerados baixos (JUNIOR et al., 2020). De acordo com esta referência, o valor médio de Ca^{+2} , na profundidade do solo de 0 a 20 cm, foi considerado também, como sendo baixo.

A menor concentração do Ca^{+2} na linha ($1,7 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) em comparação com a entrelinha ($1,9 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) (Tabela 6) justifica-se pelo fato de que as plantas estão absorvendo o nutriente e naquele local, provavelmente, a absorção era maior devido a maior concentração do sistema radicular.

Em relação aos teores de Al^{3+} , Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis, Rheinheimer et al. (2000a) obtiveram resultados de calagem após 36 meses, que indicaram que na profundidade do solo abaixo de 10 cm, a incorporação do calcário ao solo mostrou efeitos mais significativos do que a aplicação superficial. Abaixo de 10 cm de profundidade, estes autores não observaram alteração do pH e teor de Ca para a calagem superficial, permanecendo o valor inferior ao do observado para a calagem incorporada. Estes autores ainda observaram que o teor de Ca^{2+} , após 4 anos de calagem, pouco se alterou a partir de 10 cm de profundidade.

Em um estudo realizado em um Latossolo Vermelho Distrófico de textura muito argilosa, Rondonópolis, Mato Grosso, seis meses após a calagem houve modificações nos atributos do solo até 20 cm, quando o calcário foi incorporado ao solo, porém tais modificações ocorreram apenas na camada de 0 a 5 cm, quando o calcário foi aplicado na superfície (ALLEONI; CAMBRI; CAIRES, 2005). Estes autores avaliaram os atributos do solo após um longo período (18 e 30 meses após a calagem) e constataram que na parcela onde o calcário foi incorporado houve modificações até 20 cm de profundidade, porém quando a calagem foi superficial, tais modificações ocorreram apenas até 10 cm de profundidade. Eles ainda relataram que após 30 meses da calagem superficial a neutralização da acidez do solo e o aumento de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis ocorreu apenas aos 10 cm do solo. Estes autores observaram ainda, em relação aos teores de potássio e de fósforo, que não houve efeito significativo da forma de calagem, em nenhuma das camadas estudadas.

Apesar da incorporação de calcário na dose recomendada (17 ton/ha) para elevar o pH a 6 pelo método SMP, o pH do solo na área de estudo somente ultrapassou 5,5 aos 36 meses e o alumínio trocável somente foi neutralizado na profundidade de 10 cm (RHEINHEIMER et al., 2000a). Estes autores relataram que o aumento da dose de calcário aplicado na superfície do solo corrigiu melhor a acidez em profundidade a longo prazo, porém a incorporação teve um efeito sobre a acidez de imediato. Em outro trabalho, em sistema de plantio direto consolidado, no RS, em solo arenoso, (RHEINHEIMER et al., 2000b) constataram que a aplicação superficial de calcário aumentou o pH do solo somente até 5 cm de profundidade, assim como os teores de cálcio e magnésio trocáveis. A incorporação do calcário antes da adoção do sistema de plantio direto, em um Argissolo de textura média, no sul do Brasil, foi mais eficiente em modificar os atributos químicos relacionados com a acidez do solo em profundidades maiores, comparado com a calagem superficial (KAMINSKI et al., 2005).

Em outro experimento com duração de 52 meses com calagem superficial em diferentes doses, realizado em Latossolo, na região do Paraná, o calcário aplicado na superfície do solo proporcionou melhorias no controle da acidez de forma mais eficiente apenas nas camadas superficiais do solo (0 – 10 cm), comparado com profundidades de 10 a 20 cm (JORIS et al., 2013).

Tabela 5. Teor de cálcio em experimento para comparação de formas de calagem em solo cultivado com soja na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.

Profundidade de amostragem	Ca (cmol _c dm ⁻³)		
	Linha	Entre linha	Média
0-10 cm	1,7 Ab	1,9 Aa	1,8 A
10-20 cm	0,7 Ba	0,6 Ba	0,7 B
20-40 cm	0,5 Ca	0,5 Ca	0,5 C
Médias	1,0 a	1,0 a	
Calagem	Incorporado	Superficial	
	1,2 a	0,8 b	
CV (%)	2,5		

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas iguais na linha não diferem não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Transformação dos dados: Raiz quadrada de $Y + 1.0 - \text{SQRT}(Y + 1.0)$.

Houve interação entre os fatores (posição de amostragem e profundidade de amostragem) para o teor de Mg^{2+} (Tabela 7). Observou-se diferença significativa, apenas na camada de 0 a 10 cm. Essa camada apresentou diferença significativa em relação às demais, apresentando a maior concentração do elemento (0,4 cmol_c dm⁻³).

Assim como o Ca^{2+} , o Mg^{2+} apresentou maior concentração na entrelinha (0,6 cmol_c dm⁻³). Observou-se também diferença significativa para a forma de calagem, tendo o tratamento incorporado apresentado a maior média (Tabela 7). Considerando apenas o efeito da calagem, constatou-se, tanto no tratamento incorporado quanto no tratamento superficial, um valor baixo para o teor de Mg^{2+} (JUNIOR et al., 2020). De acordo com esta referência, ao analisar a profundidade do solo de 0 a 20 cm, observou-se também um valor baixo para este nutriente.

Cabe destacar que considerando a avaliação da camada de 0 a 20 cm, o valor médio de Ca^{2+} é igual a 1,2 cmol_c dm⁻³ na linha e de 1,25 cmol_c dm⁻³ na entrelinha. A soma de Ca^{2+} e Mg^{2+} (1,5 cmol_c dm⁻³) é considerado um valor baixo para a essa camada (FREIRE et al., 2013; JUNIOR et al., 2020), refletindo a necessidade de melhoria na correção do solo.

Tabela 6. Teor de magnésio em experimento para comparação de formas de calagem em solo cultivado com soja na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.

Profundidade	Mg (cmol _c dm ⁻³)		
	Linha	Entrelinha	Média
0-10 cm	0,4 Ab	0,6 Aa	0,5 A
10-20 cm	0,3 Ba	0,3 Ba	0,3 B
20-40 cm	0,2 Ba	0,2 Ca	0,2 C
Médias	0,3 a	0,3 a	
Calagem	Incorporado		Superficial
	0,4 a		0,2 b
CV (%)	2,6		

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas iguais na linha não diferem não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Transformação dos dados: Raiz quadrada de $Y + 1.0 - \text{SQRT}(Y + 1.0)$.

Houve interação entre os fatores (posição de amostragem e profundidade de amostragem) para o pH (Tabela 8), não havendo diferenças significativas entre as profundidades de amostragens.

Em relação à posição de amostragem, observou-se diferença significativa apenas na profundidade de 0 a 10 cm. Nessa profundidade, a linha de plantio apresenta maior valor para o pH (4,7) em comparação com a entrelinha (4,4). Quando se observa as médias gerais, não houve diferença significativa para a linha e entrelinha.

Cabe destacar que o valor médio de pH na linha de plantio (4,6) e na entrelinha (4,4), na camada de 0 a 20 cm de profundidade, está fora da faixa considerada como ideal para a cultura da soja, que é de 6,2 a 6,8, determinação em água (JUNIOR et al., 2020). Valores abaixo de 6,0 são classificados como fortemente ácido (FREIRE et al., 2013) ou de acidez elevada (PREZOTTI; MARTINS, 2013).

Como a calagem foi realizada em área total, era de se esperar que houvessem apenas pequenas diferenças de pH, visto que na linha de plantio a adição do adubo potássico, a atividade das raízes no processo de absorção de nutrientes e a remoção de bases, provocassem uma leve acidificação nesse local (PREZOTTI; MARTINS, 2013). Contudo, observou-se uma redução significativa do pH na entrelinha de plantio da soja, em comparação com a linha de plantio. Também era de se esperar que na profundidade de 20 a 40 cm houvesse uma diminuição significativa do pH do solo, o que não foi observado. Ainda foi observado diferença significativa entre a calagem incorporada e a superficial. Considerando apenas o efeito da calagem (Tabela 8), o valor médio para o pH (4,8) encontrado no tratamento com a calagem incorporada é considerado como sendo fortemente ácido e para a calagem superficial, o valor médio encontrado (4,3) é extremamente ácido (FREIRE et al., 2013).

Em um estudo realizado na China, com a cultura da soja, com quatro diferentes tipos de solos, em casa de vegetação, constatou-se que a altura das plantas, o teor de clorofila nas folhas e a massa seca da parte aérea foram reduzidos de forma significativa em pH baixo do solo, comparativamente ao pH mais alto (BAQUY et al., 2018). Este estudo corrobora com este trabalho, para a diferença encontrada na altura das plantas, e na massa seca da parte aérea, nas duas formas de calagem.

Tabela 7. Valor do pH em experimento para comparação de formas de calagem em solo cultivado com soja na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.

Profundidade	pH		
	Linha	Entrelinha	Média
0-10 cm	4,7 Aa	4,4 Ab	4,5 A
10-20 cm	4,6 Aa	4,5 Aa	4,6 A
20-40 cm	4,4 Aa	4,6 Aa	4,5 A
Médias	4,6 a	4,5 a	
Calagem	Incorporado		Superficial
	4,8 a		4,3 b
CV (%)	1,7		

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas iguais na linha não diferem não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Transformação dos dados: Raiz quadrada de $Y + 1.0 - \text{SQRT}(Y + 1.0)$.

Houve interação entre os fatores (posição de amostragem e profundidade de amostragem) para o teor de Al^{3+} (Tabela 9). Em relação à posição de amostragem, observou-se diferenças significativas apenas na profundidade de 20 a 40 cm. Nessa profundidade, a linha de plantio apresenta maior valor para o teor de Al^{3+} (1,0) em comparação com a entrelinha (0,7). Isso justifica-se pelo fato de que na linha as plantas estão absorvendo o nutriente e promovendo a acidificação do meio e na entrelinha, provavelmente, a absorção era menos, devido a menor concentração do sistema radicular.

Constatou-se diferença significativa entre as formas de calagem, onde o tratamento com o calcário superficial apresenta um valor médio elevado para o teor de Al^{3+} ($1,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), em comparação com a calagem incorporada ($0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Quando se observa as médias, não há diferença significativa para a posição de amostragem. A média para os teores de Al^{3+} na profundidade de 0 a 20 cm na linha de plantio é de $0,6 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e de $0,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na entrelinha, valores considerados altos, assim como o valor médio encontrado de $0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, quando se avalia o tratamento com a calagem incorporada (FREIRE et al., 2013). Estes resultados encontrados demonstram que a calagem não foi suficiente para neutralizar o Al^{3+} presente no solo, principalmente a calagem superficial.

De acordo com os resultados do trabalho de Bortoluzzi et al. (2014), a incorporação de calcário promoveu redução dos valores de Al^{3+} trocável em profundidades do solo em amplitude maiores do que a aplicação superficial, e os efeitos da incorporação foram observados também 5 anos depois. Os teores de Al^{3+} no solo seguiram tendência oposta ao pH.

Em todas as profundidades do solo analisadas, foram encontrados maiores teores médios de Al^{3+} quando o calcário foi aplicado em superfície, exceto para a profundidade de 0 a 10 cm. Estes autores ainda constataram camadas de solo pobres, quimicamente, principalmente em relação ao elevado teor de Al^{3+} , que dificultam o alongamento e a ramificação de raízes da soja, contribuindo para a diminuição da produtividade. E, ainda destacaram que a presença de altos teores de Al^{3+} limita o desenvolvimento de raízes de soja em profundidades. Estes autores relatam em seu trabalho que, com o calcário incorporado ao solo, às raízes ficaram mais finas, mais longas e apresentaram-se mais ramificadas. Estas observações parecem estar em concordância com este trabalho, uma vez que a incorporação do calcário levou a um maior número de raízes secundárias e volume de raízes como um todo (Tabela 19).

Em um experimento realizado em casa de vegetação na China, Yu et al. (2011), relataram que o comprimento e o volume das raízes de 2 cultivares de soja diminuíram acentuadamente sob a influência do Al^{3+} , em comparação com o tratamento sem alumínio.

Resultados desse trabalho contribuem para esclarecer que a presença do Al^{3+} em elevadas concentrações no perfil do solo, abaixo de 20 cm, (Tabela 8) pode ter limitado o crescimento de raízes de soja (Tabela 18).

É provável que as condições de estresse hídrico durante o período de veranico (Tabela 1) associado a elevadas concentrações de Al^{3+} no tratamento com a calagem superficial (Tabela 9), tenha provocado restrição no crescimento da soja neste estudo (Tabela 4). Corrobora para essa informação Joris et al. (2013), que observaram, através de experimento, que em condições de estresse hídrico, a toxidez causada pelo Al^{3+} comprometeu severamente o crescimento das raízes de soja e milho e a nutrição das plantas. Em outro trabalho, realizado em casa de vegetação, Reis et al. (2018) constataram que o aumento das concentrações de alumínio na solução nutritiva provocou a diminuição da massa seca da parte aérea, da massa seca da raiz, da atividade da urease e de nitrato redutase. Observaram ainda, uma diminuição no diâmetro do xilema da folha e também uma mudança na coloração verde desta.

Tabela 8. Teor de alumínio em experimento para comparação de formas de calagem em solo cultivado com soja na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.

Profundidade	Al^{3+} ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)		
	Linha	Entre Linha	Médias
0-10 cm	0,7 ABa	1,0 Aa	0,9 A
10-20 cm	0,6 Ba	0,7 Aa	0,7 A
20-40 cm	1,0 Aa	0,7 Ab	0,8 A
Médias	0,8 a	0,8 a	
Calagem	Incorporado		Superficial
	0,4 b		1,1 a
CV (%)	5,7		

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas iguais na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Transformação dos dados: Raiz quadrada de $Y + 1.0 - \text{SQRT}(Y + 1.0)$.

Foi observado que houve interação entre os fatores (calagem e posição de amostragem; calagem e profundidade de amostragem; posição de amostragem e profundidade de amostragem) para a concentração de fósforo (P) (Tabela 10). Em relação à posição de amostragem, observou-se diferenças significativas entre as formas de calagem tanto na linha como na entrelinha, tendo a calagem incorporada apresentado a maior média (Tabela 10). Em relação à forma de calagem, na profundidade de 0 a 20 cm, para a calagem incorporada, a linha de plantio apresenta a menor concentração do nutriente em comparação com a entrelinha, tal como ocorreu para Ca^{+2} e Mg^{+2} . Isso ocorreu porque na linha de plantio, provavelmente, as plantas absorveram mais nutrientes comparativamente à entrelinha. Em relação à profundidade de amostragem, para todas, houve diferenças significativas entre as formas de calagem, para a concentração de P (tabela 10). Para a calagem incorporada, observou-se que o melhor tratamento ($P = 23,3 \text{ mg dm}^{-3}$) foi na camada de 0 a 10 cm. Ainda analisando apenas a calagem incorporada, observou-se que nas profundidades de 10 a 20 e 20 a 40 não houve diferenças significativas. Porém para essa mesma profundidade, analisando apenas a calagem superficial, foram observadas diferenças significativas, tendo a camada de 20 a 40 cm apresentado a menor média ($P = 1,6 \text{ mg dm}^{-3}$). Cabe destacar que na camada de 0 a 20 cm, o P apresentou uma concentração média igual a 15 mg dm^{-3} (calcário incorporado) e igual a $12,1 \text{ mg dm}^{-3}$ (calagem superficial), valores considerados como sendo médios (FREIRE et al., 2013; JUNIOR et al., 2020).

Os resultados apresentados demonstram a importância da calagem incorporada para a disponibilidade de P no solo (Tabela 10).

Em relação à posição de amostragem houve diferenças significativas para a profundidade de 0 a 10 e 20 a 40 nos teores de P. Para a profundidade de 0 a 10 cm na linha de plantio observou-se a maior concentração de P ($23,9 \text{ mg dm}^{-3}$) em comparação com a entrelinha ($19,5 \text{ mg dm}^{-3}$). Analisando a profundidade de 20 a 40 observou-se que na entrelinha houve uma maior concentração do P ($5,5 \text{ mg dm}^{-3}$) diferindo significativamente da linha ($3,3 \text{ mg dm}^{-3}$). Era de se esperar que a concentração do fósforo na camada superficial (0 a 10 cm) na linha fosse maior em comparação com a entrelinha, visto que a adubação com esse nutriente ocorre de forma localizada na linha de plantio da cultura. Cabe ainda destacar, que na calagem superficial, a elevada concentração de Al^{3+} presente no solo pode ter precipitado o fósforo, na forma de fosfato de alumínio e/ou a concentração de Ca^{+2} na superfície do solo pode ter precipitado o fósforo, formando compostos pouco solúveis, fosfato de alumínio e fosfato de cálcio, tornando o P menos disponível às plantas (MEYER et al., 2020).

Neste trabalho o fósforo foi adicionado de forma localizada na linha de plantio da soja, a uma profundidade onde ocorre o maior efeito da calagem superficial, portanto, era de se esperar que o P tenha sido precipitado pelo Ca^{+2} .

Em um trabalho, em casa de vegetação, na Universidade Federal da Grande Dourados, no ano de 2004 a 2005, constatou-se por meio de dois experimentos que a disponibilidade de P no solo aumentou significativamente com o aumento do pH dos solos (VIVIANI et al., 2010).

Tabela 9. Teor de fósforo em experimento para comparação de formas de calagem em solo cultivado com soja na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.

Posição de amostragem	P (mg dm^{-3})		
	Calcário incorporado	Calcário superficial	Médias
Linha	11,8 Ba	9,8 Ab	10,8 A
Entrelinha	13,1 Aa	7,4 Bb	10,3 A
Médias	12,4 a	8,6 b	
CV (%)	4,5		
Profundidade de amostragem	P (mg dm^{-3})		
	Calcário incorporado	Calcário superficial	Média
0-10 cm	23,3 Aa	20,1 Ab	21,7 A
10-20 cm	6,7 Ba	4,2 Bb	5,4 B
20-40 cm	7,2 Ba	1,6 Cb	4,4 C
Médias	12,4 a	8,6 b	
CV (%)	4,5		
Profundidade de amostragem	P (mg dm^{-3})		
	Linha	Entrelinha	Médias
0-10 cm	23,9 Aa	19,5 Ab	21,7 A
10-20 cm	5,1 Ba	5,8 Ba	5,4 B
20-40 cm	3,3 Cb	5,5 Ba	4,4 C
Médias	10,8 a	10,3 a	
CV (%)	4,5		

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas iguais na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Transformação dos dados: Raiz quadrada de $Y + 1,0 - \text{SQRT}(Y + 1,0)$

Foi observado que houve interação tripla entre os fatores (forma de calagem, posição de amostragem e profundidade de amostragem) para o teor de potássio (K) (tabela 11). Em relação à linha de plantio, observou-se diferenças significativas entre as formas de calagem para todas as profundidades. Na profundidade de 0 a 20 cm observa-se, para a calagem incorporada, um teor médio de K^+ de 108 mg dm^{-3} , diferindo significativamente da área com calagem superficial que apresenta teores médios de K^+ igual a $86,5 \text{ mg dm}^{-3}$. O teor de K^+ encontrado nesta profundidade, para a calagem incorporada é considerado médio (FREIRE et al., 2013). Nesta posição de amostragem, na profundidade de 20 a 40 cm, que apresentou diferença significativa para a forma de calagem, os teores de K^+ médios foram: 39 mg dm^{-3} e $19,7 \text{ mg dm}^{-3}$, para a calagem incorporada e superficial, respectivamente. Estes resultados indicam que a calagem incorporada disponibilizou uma quantidade maior de K^+ para as plantas.

Em relação à entrelinha não foram observadas diferenças significativas quanto aos teores de K^+ para as formas de calagem em nenhuma das profundidades analisadas. Entretanto, foram observadas diferenças significativas dentro de cada forma de calagem nas diferentes profundidades. Observou-se que houve diferença significativa na profundidade de 0 a 10 cm comparando-se a linha com a entrelinha em ambas as formas de calagem. Além disso, observou-se diferença significativa na linha, na profundidade de 10 a 20 cm, entre a calagem incorporada e superficial, com maior média para esta forma de calagem. Provavelmente, ocorreu um aumento das cargas negativas na CTC do solo provocado pelo efeito da calagem superficial nos primeiros 5 centímetros, na linha de plantio (KASEKER et al., 2022). De acordo com este autor o Ca^{2+} e Mg^{2+} competem com o K^+ pelo mesmo sítio de adsorção. Portanto, pode ter ocorrido uma maior retenção de íons Ca^{2+} e Mg^{2+} pela CTC do solo, através da ação de massa, ocupando o lugar do K^+ , e como consequência este nutriente pode ter sido lixiviado para a camada de 10 a 20 cm. Corrobora com essa hipótese, a seguinte informação: quando a quantidade de nutrientes catiônicos adicionados ao solo for superior à CTC, esses nutrientes podem ser perdidos pelo processo de lixiviação (PREZOTTI; MARTINS, 2013). Outra hipótese é a de que na calagem incorporada, na linha de plantio, na profundidade de 10 a 20 cm, as plantas estariam absorvendo maior quantidade de K^+ , em comparação com a calagem superficial (Tabela 11).

Era de se esperar que a maior concentração de K^+ estivesse presente na linha de plantio e nos primeiros 10 cm do solo, visto que a adubação com este nutriente ocorre neste local. E, como consequência, para a mesma forma de calagem, o conteúdo de K^+ decresce com a profundidade do solo (Tabela 11). Cabe destacar que os teores de matéria orgânica normalmente são maiores na camada superficial do solo, contribuindo também com os maiores teores de bases nesse local.

Tabela 10. Teor de potássio em comparação a formas de calagem em solo cultivado com soja na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.

Profundidade de amostragem	Posição de amostragem	Teores de K ⁺ (mg dm ⁻³)	
		Calcário	
		Incorporado	Superficial
0 a 10	Linha	185,4 Aa (A)	132,8 Ab (A)
10 a 20	Linha	32,0 Cb (A)	40,2 Ba (A)
20 a 40	Linha	39,0 Ba (A)	19,7 Cb (A)
0 a 10	Entrelinha	70,9 Aa (B)	67,7 Aa (B)
10 a 20	Entrelinha	30,6 Ba (A)	28,5 Ba (B)
20 a 40	Entrelinha	22,6 Ca (B)	19,6 Ca (A)
Média		63,4 a	51,4 b
CV (%)		3,8	

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Médias seguidas de letras minúsculas iguais na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. E médias seguidas de letras maiúsculas iguais entre parênteses na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Transformação dos dados: Raiz quadrada de $Y + 1.0 - \text{SQRT}(Y + 1.0)$.

Houve interação entre os fatores (posição de amostragem e profundidade de amostragem) para a soma de bases (S) (Tabela 12). Constatou-se diferença significativa entre as formas de calagem, onde o tratamento com o calcário incorporado apresenta um valor médio (1,8 cmol_c dm⁻³) e na calagem superficial o valor médio é de 1,2 cmol_c dm⁻³.

Em relação à profundidade de 0 a 10 e 10 a 20 cm, observou-se que houve diferença significativa para a posição de amostragem. Na profundidade de 0 a 10 foi observado um valor maior de S (2,8 cmol_c dm⁻³) na entrelinha, comparado com a linha de plantio (S = 2,6 cmol_c dm⁻³). Isso se justifica pelo fato de que na linha as plantas estão absorvendo mais nutriente, principalmente Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ e na entrelinha, provavelmente, a absorção era menos, devido a menor concentração do sistema radicular. Por outro lado, para a profundidade de 10 a 20 cm, a análise revela uma relação inversa à citada anteriormente, com um valor de S na linha de 1,2 cmol_c dm⁻³ em comparação com a entrelinha, que foi de 1,0 cmol_c dm⁻³. Esses resultados revelam que o nutriente K⁺ cuja adubação ocorreu na linha de plantio, contribuiu para elevar o valor de S, neste local analisado. Foram observadas diferenças significativas para todas as profundidades, para cada uma das posições de amostragem. E ainda, para cada posição, os valores de S diminuem da camada superior para a inferior, conforme a ordem: 0 a 10; 10 a 20 e 20 a 40 cm. Observou-se ainda diferença significativa para a forma de calagem, tendo a calagem incorporada apresentado maior valor médio para a soma de bases, porém, esse valor é considerado como sendo baixo (PREZOTTI; MARTINS, 2013).

Era de se esperar maiores valores médios de S para a calagem incorporada, porque nesse tratamento constatou-se maiores valores médios para Ca⁺², Mg⁺² e K⁺.

Tabela 11. Soma de bases (S%) em diferentes formas de calagem em solo cultivado com soja na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.

Profundidade de amostragem	Soma de bases S (%)		
	Linha	Entrelinha	Médias
0-10 cm	2,6 Ab	2,8 Aa	2,7 A
10-20 cm	1,2 Ba	1,0 Bb	1,1 B
20-40 cm	0,8 Ca	0,7 Ca	0,8 C
Médias	1,5 a	1,5 a	
CV (%)	2,6		
Calagem	Incorporado	Superficial	
	1,8 a	1,2 b	

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas iguais na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Transformação dos dados: Raiz quadrada de $Y + 1.0 - \text{SQRT}(Y + 1.0)$.

Foi observado que não houve interação entre os fatores para o valor de CTC do solo (Tabela 13). A calagem incorporada apresentou um valor médio menor para a CTC, diferindo estatisticamente da calagem superficial. Já, a linha de plantio apresentou um valor médio maior para CTC, em comparação com a entrelinha.

Normalmente, Neossolos possuem uma baixa CTC e ela está relacionada aos teores de matéria orgânica do solo. Como na área onde o calcário foi incorporado, apresentou menores valores para matéria orgânica do solo (Tabela 16) em relação à área onde a calagem foi superficial, era de se esperar que a CTC também diminuísse com a incorporação do calcário.

Estes valores encontrados para a CTC do solo podem ser considerados como sendo médios (PREZOTTI; MARTINS, 2013).

Tabela 12. Valor da CTC em experimento para comparação de formas de calagem em solo cultivado com soja na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.

Calagem	CTC (cmol _c dm ⁻³)	
	Incorporado	Superficial
Médias	5,8 b	7,7 a
Posição de coleta	Linha	Entrelinha
	Médias	7,1 a
		6,5 b
CV (%)	4,1	

Médias seguidas de letras minúsculas iguais na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Transformação dos dados: Raiz quadrada de $Y + 1.0 - \text{SQRT}(Y + 1.0)$.

Houve interação entre os fatores (Posição de amostragem e profundidade de amostragem) para o valor de saturação por bases - V% (Tabela 14). Constatou-se também diferença significativa entre as formas de calagem, com o melhor tratamento representado pela calagem incorporada.

Em relação à posição de amostragem, observou-se diferença apenas na camada de 0 a 10 cm, sendo que na linha de plantio o valor médio de V% (37,3) foi menor do que na entrelinha ($V = 48,2\%$).

Como foi observado que não houve diferença média para o valor de S (%) entre as duas posições de amostragem e que a CTC na linha é maior, esperava-se que o V (%) fosse menor neste local, o que realmente ocorreu.

Dentro de cada posição de amostragem, observou-se diferenças significativas no valor de V% tanto para linha quanto para entrelinha, nas três profundidades de amostragem e os valores decrescem com o aumento da profundidade. Isso está correlacionado com o valor de S (%) para essas profundidades analisadas, cujo valor também decresceu.

Apesar de ter encontrado uma maior média para V% na profundidade do solo de 0 a 10 cm, este valor ainda é considerado como sendo baixo (PREZOTTI; MARTINS, 2013).

Tabela 13. Valor V (%) em experimento para comparação de formas de calagem em solo cultivado com soja na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.

Profundidade de amostragem	V (%)		
	Linha	Entrelinha	Médias
0-10 cm	37,3 Ab	48,2 Aa	42,8 A
10-20 cm	18,1 Ba	16,8 Ba	17,5 B
20-40 cm	13,0 Ca	11,9 Ca	12,5 C
Médias	22,8 b	25,7 a	
Calagem	Incorporado		Superficial
	31,6 a		16,9 b
CV (%)	5,6		

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de significância. Transformação dos dados: Raiz quadrada de $Y + 1.0 - \text{SQRT}(Y + 1.0)$.

Houve interação entre os fatores (posição de amostragem e profundidade de amostragem) para a saturação por alumínio (m %) (Tabela 15). Não foram observadas diferenças significativas para o valor de m (%) em relação à posição de amostragem. Porém, foi observada diferença significativa para a forma de calagem, tendo a calagem incorporada apresentado a menor média. Dentro da linha de plantio, na profundidade de 0 a 10 cm e 10 a 20 cm, não se observaram diferenças significativas, diferindo-se da profundidade de 20 a 40 cm, cujo valor médio apresentado é o maior.

Em relação à entrelinha, observou-se que apenas a profundidade de 0 a 10 cm difere significativamente das demais. Era de se esperar esse comportamento, devido ao fato de que a calagem em superfície influencia nos atributos do solo, apenas nos primeiros 10 centímetros (ALLEONI; CAMBRI; CAIRES, 2005). Além disso, a calagem incorporada reage ao longo dos 20 cm de profundidade do solo. Portanto, era de se esperar que não houvesse diferenças significativas na profundidade de 0 a 10 cm e 10 a 20 cm, para a calagem incorporada. Os resultados encontrados indicam que em ambas as formas de calagem, na profundidade do solo de 20 a 40 cm, há uma elevada saturação por alumínio (Tabela 15). Estes resultados contribuem para explicar porque as raízes de soja cresceram apenas até a profundidade média de 20 cm no solo, nas duas formas de calagem.

Quando se considera a forma de calagem isoladamente, na calagem incorporada constatou-se um valor de m (%) baixo, porém, quando observou-se o tratamento com a calagem superficial, constatou-se um valor de m (%) de médio a alto (SOBRAL et al., 2015).

Tabela 14. Saturação por alumínio (m%) em experimento para comparação de formas de calagem em solo cultivado com soja na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.

Profundidade de amostragem	Saturação por Al ³⁺ (%)		
	Linha	Entrelinha	Médias
0-10 cm	21,2 Ba	25,3 Ba	23,3 C
10-20 cm	30,5 Ba	37,5 Aa	34,0 B
20-40 cm	50,4 Aa	42,7 Aa	46,6 A
Médias	34,0 a	35,2 a	
Calagem	Incorporado		Superficial
	21,2 b		48,0 a
CV (%)	5,6		

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas iguais na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4.2 Matéria Orgânica

Os resultados para os teores de matéria orgânica no solo estão apresentados na Tabela 16. Foi observado que houve interação tripla entre os fatores (profundidade de amostragem, posição de amostragem e forma de Calagem) para os teores de matéria orgânica no solo (Tabela 16). Observou-se que houve diferença significativa para os teores de matéria orgânica (%) em relação à forma de calagem para todas as profundidades analisadas, independentemente da posição de amostragem. O tratamento com a calagem incorporada apresentou os menores teores de matéria orgânica, tanto para a linha quanto para a entrelinha (Tabela 16). Para a calagem incorporada, tanto na linha quanto na entrelinha, na profundidade de 0 a 10 e 10 a 20 cm, não foram observadas diferenças significativas e quando se comparou essas camadas com a profundidade de 20 a 40 cm, observou-se diferenças significativas para a entrelinha e pequenas diferenças para a linha, com esta última camada apresentando a menor média para os teores de matéria orgânica do solo. Já, para a calagem superficial na linha de plantio na profundidade de 0 a 10 e de 10 a 20 cm, não foram observadas diferenças significativas. Analisando a mesma forma de calagem anterior, na entrelinha de plantio, observou-se que há diferenças significativas entre as profundidades de amostragem de 0 a 10 e 10 a 20 cm, com esta última apresentando a menor média, porém não diferindo significativamente da profundidade de 20 a 40 cm (Tabela 16).

Na calagem incorporada quando se comparou ambas posições de amostragem, na mesma profundidade, não foram observadas diferenças significativas. Porém, quando se fez essa comparação na calagem superficial, observou-se diferença significativa entre as posições de amostragem, apenas na profundidade de 10 a 20 cm, tendo a entrelinha apresentado a menor média para o teor de matéria orgânica (Tabela 16).

Resultados do trabalho de Alleoni, Cambri e Caires (2005) demonstraram haver efeito da forma de aplicação do calcário nos teores de matéria orgânica do solo (MO), quando relataram que na camada do solo de 0 a 5 cm de profundidade, avaliada 18 meses após a aplicação do calcário em superfície, apresentou teores de MO maior comparado com a calagem incorporada. Porém, a análise dos resultados revelou que na camada de 5 a 10 cm foram observados teores maiores de MO para a calagem incorporada, somente 6 meses após a calagem. Estes autores relataram que isso pode ter ocorrido através da incorporação de resíduos vegetais em profundidade no solo, junto com a incorporação do calcário.

Com o revolvimento do solo para a incorporação do calcário aumentou a aeração e o contato entre o solo e os resíduos orgânicos da superfície e isso contribuiu para aumentar a mineralização da MO (ALLEONI; CAMBRI; CAIRES, 2005). Além disso, no processo de incorporação do calcário misturou-se a camada de solo de 0 a 10 e de 10 a 20 cm, diluindo a matéria orgânica do solo na profundidade de 0 a 20 cm.

Cabe destacar que na calagem incorporada houve aumento do valor médio de pH (Tabela 8) e isso contribuiu também para uma maior mineralização da matéria orgânica do solo. Além disso, o revolvimento do solo também contribuiu através da aeração, para uma melhor atividade dos microrganismos sobre a matéria orgânica.

Considerando a média para o teor de matéria orgânica (%), na camada de 0 a 20 cm, no tratamento com a calagem superficial, constatou-se que foi um valor baixo (SOBRAL et al., 2015; FREIRE et al., 2013).

Tabela 15. Teores de matéria orgânica no solo, na linha e entrelinha de plantio da soja, em diferentes profundidades, em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.

Profundidade de amostragem	Posição de amostragem	Teores de matéria orgânica (%)		
		Calcário		
		Incorporado	Superficial	Média
0 a 10	Linha	1,1 Ab(A)	1,6 Aa(A)	1,3 A
10 a 20	Linha	1,0 ABb(A)	1,4 Aa(A)	1,2 B
20 a 40	Linha	0,9 Bb(A)	1,2 Ba(A)	1,0 C
0 a 10	Entrelinha	1,0 Ab(A)	1,7 Aa(A)	1,3 A
10 a 20	Entrelinha	1,0 Ab(A)	1,2 Ba(B)	1,2 B
20 a 40	Entrelinha	0,7 Bb(A)	1,3 Ba(A)	1,0 C
Média		1,0 b	1,4 a	
CV (%)		7,38		

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas iguais na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. E médias seguidas de letras maiúsculas iguais entre parênteses na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4.3 Nodulação das Plantas de Soja nas duas Formas de Calagem

Não houve interação entre os fatores (cultivar de soja e forma de calagem), porém, houve diferença significativa na nodulação quanto às cultivares e também para a forma de calagem (Tabela 17). Tanto para o número de nódulos quanto para a massa de nódulos secos, observou-se maiores valores médios para a cultivar M 5917 IPRO, tendo se diferenciado significativamente das demais cultivares (Tabela 17). Quanto à forma de calagem, observou-se maior valor médio na massa de nódulos para a calagem incorporada, porém não houve diferença significativa para o número de nódulos.

Na fase de início de florescimento, a planta de soja para estar bem nodulada deve apresentar, no campo, pelo menos cerca de 15 nódulos e uma massa seca de nódulos de ao menos 100 mg, de forma a garantir o suprimento de N às plantas (HUNGRIA et al., 2006). Assim sendo, apesar das variações entre cultivares e forma de calagem, os resultados do trabalho (Tabela 17) mostram boa resposta das plantas e indicam que a nodulação foi eficiente para todas as cultivares. Obviamente, destaque ocorreu para a cultivar M 5917 IPRO que apresentou uma média para a massa de nódulos secos acima de 304 mg e 45 nódulos por planta.

Essa diferença entre cultivares pode se dar por diversos fatores, tanto da genética da planta quanto outros fatores bióticos (capacidade de nodulação das estirpes de *Bradyrhizobium*) e abióticos, como por exemplo, o tratamento das sementes com fungicidas (ZILLI et al., 2009). Neste estudo o tratamento das sementes com fungicida não parece ter influenciado negativamente as bactérias, haja vista que a cultivar que já havia sido tratada com fungicida foi a 95R95, que apresentou boa nodulação (Tabela 17).

Em um trabalho realizado em casa de vegetação, Bohrer e Hungria (1998) constataram diferenças entre cultivares, em relação à nodulação. Este resultado corrobora com o nosso trabalho, para as diferenças encontradas entre as cultivares testadas.

Tabela 16. Massa de nódulos secos e número de nódulos de plantas de soja em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.

Cultivar	Massa de nódulos secos (mg planta⁻¹)
M 5917	304,4 A
BRS 5980 IPRO	160,0 B
95R95 IPRO	207,4 AB
BRS 7981 IPRO	253,6 AB
Calagem	Média
Calcário incorporado	264,4 A
Calcário superficial	198,2 B
CV (%)	19,9
Cultivar	Número de nódulos (planta⁻¹)
M 5917	45 A
BRS 5980 IPRO	33 B
95R95 IPRO	27 B
BRS 7981 IPRO	29 B
Calagem	Média
Calcário incorporado	33 A
Calcário superficial	34 A
CV (%)	21,06

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Transformação dos dados para massa de nódulos: Raiz quadrada de $Y + 1.0 - \text{SQRT}(Y + 1.0)$.

4.4 Comprimento da Raiz Principal, Número de Raízes Secundárias e Volume de Raízes das Plantas de Soja

Em relação ao comprimento da raiz principal não houve interação entre os fatores e não houve diferença significativa entre cultivares e nem entre as formas de calagem (Tabela 18). Entretanto, foi observado que houve interação entre as formas de calagem para o número de raízes secundárias e também para o volume de raízes (Tabela 19). Em relação ao número de raízes secundárias observou-se diferenças significativas para a forma de calagem em todas as cultivares, com exceção BRS 7981 IPRO. No tratamento com a calagem incorporada não se observou diferença significativa entre as cultivares. Porém, na calagem superficial observou-se que as cultivares responderam de forma diferente, sendo que a cultivar BRS 7981 IPRO apresentou diferença significativa, com valores médios superiores às cultivares M 5917 IPRO e BRS 5980 IPRO (Tabela 19) e semelhança com a 95R95 IPRO.

Em relação ao volume de raízes também houve diferenças significativas entre as cultivares para a forma de calagem. Com exceção da cultivar BRS 5980 IPRO, todas as cultivares apresentaram maiores médias para essa característica, na calagem superficial.

No tratamento com a calagem incorporada, observou-se diferenças significativas apenas para a cultivar BRS 7981 IPRO que se apresenta com uma maior média, em comparação com as demais cultivares, que são idênticas entre si.

Segundo Prezotti e Martins (2013), o Al^{3+} provoca o engrossamento de raízes, redução no seu crescimento e impede a formação de pelos radiculares, afetando a absorção de água e nutrientes, de forma negativa. Foi constatado (observação pessoal) que as plantas presentes no tratamento com a calagem superficial, apresentaram-se com a raiz principal mais grossa, quando comparadas com aquelas presentes na calagem incorporada.

A inibição do crescimento radicular provocada pelo alumínio, se dá de forma diferente entre espécies de plantas e entre cultivares da mesma espécie (MATSUMOTO, 2000). Isso provavelmente pode ter ocorrido com a cultivar BRS 7981 IPRO, que parece ser menos sensível ao Al^{3+} . Além disso, as elevadas concentrações de Al^{3+} e a baixa concentração de Ca^{2+} , na profundidade de 20 a 40 cm do solo, podem ter sido o principal fator responsável pela inibição do crescimento das raízes da soja em profundidade (SOUSA; LOBATO, 1996). Para Marschner (1991), o Al^{3+} , além de inibir o crescimento radicular, também pode reduzir a absorção e transporte de Ca^{2+} e água para a parte aérea. Segundo o autor, nestas condições o Al^{3+} estimula o aumento de raízes laterais. Em outro trabalho, realizado na China, Baquy et al. (2018) observaram que o sistema radicular da soja foi danificado pela toxidez provocada pelo Al^{3+} .

Em um estudo realizado por Souza et al. (2012), em casa de vegetação, no departamento de Ciência do solo da Universidade Federal de Lavras – MG, constatou-se que a compactação do solo provocou a diminuição do acúmulo de nutrientes na parte aérea da soja.

De acordo com Goedert, Schermack e Freitas (2002), a compactação do solo provoca resistência à penetração das raízes, reduz a aeração do solo e sua disponibilidade de água e nutrientes às plantas, causando queda de produtividade agrícola.

Cabe destacar que no tratamento com a calagem incorporada, o processo de aração e gradagem contribui para a descompactação do solo, tornando o ambiente melhor para o desenvolvimento do sistema radicular da soja. Por outro lado, não foi avaliado a compactação do solo no tratamento com a calagem superficial. Além do elevado teor de Al^{3+} (Tabela 9), o solo poderia estar compactado neste local, e isso poderia ter afetado a absorção de nutrientes pela soja, de forma negativa.

Tabela 17. Comprimento de raízes da soja, em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.

Cultivares	Comprimento da raiz principal (cm)
M 5917	19,25 A
BRS 5980 IPRO	18,85 A
95R95 IPRO	17,40 A
BRS 7981 IPRO	18,40 A
Calagem	Médias
Calcário incorporado	18,4 A
Calcário superficial	18,5 A
CV (%)	11,0

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 18. Número de raízes secundárias e volume de raízes da soja, em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.

Cultivares	Número de raízes secundárias		
	Calcário incorporado	Calcário superficial	Média
M 5917 IPRO	66,0 Aa	50,2 BCb	58,1 A
BRS 5980 IPRO	61,2 Aa	41,2 Cb	51,2 B
95R95 IPRO	66,0 Aa	54,2 ABb	60,1 A
BRS 7981 IPRO	68,0 Aa	63,0 Aa	65,5 A
Média	65,3 a	52,1 b	
CV (%)	5,19		
Cultivares	Volume de raízes (cm ³)		
	Calcário incorporado	Calcário superficial	Média
M 5917 IPRO	6,4 Bb	9,0 Aa	7,7 B
BRS 5980 IPRO	8,0 ABa	5,8 Bb	6,9 B
95R95 IPRO	5,8 Bb	9,0 Aa	7,4 B
BRS 7981 IPRO	10,0 Aa	9,4 Aa	9,7 A
Média	7,5 a	8,3 a	
CV (%)	9,0		

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% probabilidade. Transformação dos dados: Raiz quadrada de $Y + 1.0$ - SQRT ($Y + 1.0$).

4.5 Massa Seca da Parte Aérea da Soja e de Raízes

Foi observado que não houve interação entre forma de calagem e cultivar para a massa seca de raízes (Tabela 20), porém houve interação para a massa seca da parte aérea (Tabela 21). Em relação à massa seca da parte aérea observou-se diferenças significativas entre as cultivares para a forma de calagem, com exceção da cultivar BRS 7981 IPRO. Além disso, no tratamento com a incorporação do calcário, as cultivares apresentaram a maior média para essa característica analisada, destacando a cultivar M 5917 que apresentou a maior média de massa seca da parte aérea, diferindo significativamente das demais (Tabela 21). Para a massa seca de raiz não se observou diferenças significativas entre as cultivares em relação à forma de calagem. Para esse mesmo parâmetro, analisando a fonte de variação cultivar, observa-se que a M 5917 foi a que apresentou a maior média de massa seca da raiz, diferindo estatisticamente da BRS 5980 que apresenta a segunda maior média e que é diferente estatisticamente das demais, as quais foram consideradas inferiores (Tabela 20).

No momento da coleta das raízes as plantas ainda não haviam passado por um estresse hídrico (Tabela 1), o que certamente contribuiu para não haver diferenças entre as cultivares para a forma de calagem, para a massa seca de raízes. Por outro lado, as diferenças entre as cultivares, provavelmente, são de ordem genética. Em relação à massa seca da parte aérea, parece que houve um efeito do alumínio no processo de absorção de água, nutrientes, e na fotossíntese, contribuindo para a diferença entre as cultivares em relação à forma de calagem (REIS et al., 2018).

De acordo com Eekhout, Larsen e De Veylder (2017), valores de pH abaixo de 5, além de provocar a inibição do crescimento radicular, também provoca a diminuição da absorção de nutrientes e crescimento das plantas.

Esta informação corrobora com os resultados encontrados neste trabalho, tanto para o acúmulo de nutrientes na parte aérea (Tabelas 22 a 26) quanto para a altura das plantas de soja (Tabelas 4 e 5).

Em um trabalho realizado em sistema hidropônico na Universidade Estadual da Carolina do Norte, Estados Unidos da América, Tolley-Henry e Raper (1986) constataram que o aumento da acidez da rizosfera provocou a diminuição do teor de massa seca das plantas. Em outro trabalho, realizado em casa de vegetação, na Universidade Federal de Goiás, Lima et al. (2003) observaram um efeito negativo do Al^{3+} na produção de massa seca da parte aérea da soja. Constataram ainda, que houve um efeito negativo maior em solo arenoso em comparação com o solo argiloso. Em um estudo realizado na China, com a cultura da soja, em casa de vegetação, Baquy et al. (2018) constataram que houve uma relação de forma linear e negativa, entre a massa seca da parte aérea da soja e a saturação por Al^{3+} no solo.

Tabela 19. Massa seca de raízes em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.

Cultivar	Massa seca de raízes (g planta ⁻¹)
M 5917	3,19 A
BRS 5980 IPRO	2,72 B
95R95 IPRO	1,70 C
BRS 7981 IPRO	1,60 C
CV (%)	6,1
Calcário	Médias
Calcário incorporado	2,34 A
Calcário superficial	2,26 A

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% probabilidade. Transformação dos dados: Raiz quadrada de $Y + 1.0 - \sqrt{Y + 1.0}$.

Tabela 20. Massa seca da parte aérea em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.

Cultivares	Massa seca da parte aérea (g planta ⁻¹)		
	Calcário incorporado	Calcário superficial	Média
M 5917 IPRO	13,24 Aa	10,50 Ab	11,87 A
BRS 5980 IPRO	11,64 Ba	10,24 ABb	10,94 B
95R95 IPRO	10,72 BCa	9,40 Bb	10,06 C
BRS 7981 IPRO	10,47 Ca	10,71 Aa	10,50 BC
Média	11,51 a	10,21 b	
CV (%)	2,5		

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% probabilidade. Transformação dos dados: Raiz quadrada de $Y + 1.0 - \sqrt{Y + 1.0}$.

4.6 Acúmulo de Nutrientes na Parte Aérea da Soja

Neste trabalho, na fase de pré-florescimento, constatou-se que o acúmulo de macronutrientes pelas cultivares de soja, apresentou a seguinte ordem decrescente: N, K, Ca, Mg, P. Corrobora com esta informação, o estudo realizado por Bataglia et al. (1976), no município de São Simão, SP, onde observaram esta mesma ordem, para a quantidade de nutrientes extraídos pela parte aérea da soja, cultivar Santa Rosa.

Houve interação entre os fatores (calagem e cultivar) para o acúmulo de cálcio na parte aérea da soja (Tabela 22). Observou-se diferenças significativas para todas as cultivares em relação à forma de calagem, e a calagem incorporada apresentou as maiores médias para o acúmulo desse nutriente na parte aérea. No tratamento com a calagem incorporada, a cultivar M 5917 IPRO apresentou a maior média para o acúmulo de Ca^{2+} e a BRS 7981 IPRO apresenta a menor média, comparando-se com as demais cultivares que não diferiram entre si. No tratamento com a calagem superficial, observou-se pequenas diferenças entre as cultivares.

Em um estudo realizado em casa de vegetação, em solução nutritiva, Reis et al. (2018) constataram que os acúmulos de nutrientes na parte aérea da soja diminuíram com a aplicação de níveis considerados tóxicos de alumínio (0,12 e 0,4 cmol L^{-1}). Entre estes nutrientes, observou-se que P, Ca e Mg diminuíram linearmente (32%, 22% e 19%, respectivamente). Além disso, observaram ainda danos às raízes provocados pela elevada concentração de alumínio, principalmente na região da coifa, afetando o seu crescimento. A principal consequência destas alterações nas raízes é a menor absorção de água e nutrientes, relatada neste estudo. Estes autores constataram, além da mudança na cor da folha, um aumento da transpiração da planta e diminuição da concentração interna de gás carbônico (CO_2), indicando um efeito negativo do alumínio no processo de fotossíntese.

Neste estudo, é provável que o alumínio tenha inibido a absorção de cálcio, principalmente na calagem superficial. Corroborar para esta informação Matsumoto (2000). De acordo com este autor, a toxidez provocada pelo Al^{3+} é o fator mais prejudicial para o crescimento das plantas em solos ácidos.

Tabela 21. Acúmulo de cálcio na parte aérea da soja em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.

Cultivar	Ca^{2+} (mg planta ⁻¹)		Média
	Calcário incorporado	Calcário superficial	
M 5917 IPRO	150 Aa	98 Ab	124 A
BRS 5980 IPRO	126 Ba	94 ABb	110 B
95R95 IPRO	114 Ba	82 Bb	098 C
BRS 7981 IPRO	094 Ca	80 Bb	087 D
Média	121 A	88 B	
CV (%)		0,4	

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% probabilidade. Transformação dos dados: Raiz quadrada de $Y + 1.0 - \text{SQRT}(Y + 1.0)$.

Houve interação entre os fatores (forma de calagem e cultivar) para o acúmulo de potássio na parte aérea da soja (Tabela 23). Observou-se diferenças significativas para todas as cultivares em relação à forma de calagem, exceto para a cultivar BRS 7981 IPRO. E a calagem incorporada apresentou as maiores médias para o acúmulo desse nutriente na parte aérea. No tratamento com a calagem incorporada, a M 5917 IPRO se destacou com a maior média, seguida da BRS 5980 IPRO, que diferiram significativamente entre si e em relação às demais cultivares que não diferiram entre si. No tratamento com a calagem superficial, observou-se o mesmo comportamento das cultivares para o cálcio.

Os teores de K^+ na planta para um crescimento adequado está na faixa de 20 a 50 g kg^{-1} de matéria seca (FURLANI, 2019). As cultivares testadas neste trabalho apresentam valores (g kg^{-1}) que estão dentro dessa faixa.

Como foi relatado em vários trabalhos, citados neste estudo, a acidez do solo interfere no acúmulo de nutrientes na parte aérea das plantas e para o nutriente potássio, provavelmente, isso também tenha ocorrido. Cabe destacar que a cultivar BRS 7981 IPRO apresenta um comportamento diferente das demais, provavelmente, isso pode estar relacionado a um fator genético.

Tabela 22. Acúmulo de potássio na parte aérea da soja em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.

Cultivar	K ⁺ (mg planta ⁻¹)		Média
	Calcário incorporado	Calcário superficial	
M 5917 IPRO	352 Aa	242 ABb	297 A
BRS 5980 IPRO	302 Ba	256 Ab	279 A
95R95 IPRO	248 Ca	200 Bb	224 B
BRS 7981 IPRO	212 Ca	198 Ba	205 B
Média	278 a	224 b	
CV (%)	10,4		

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% probabilidade.

Houve interação entre os fatores (forma de calagem e cultivar) para o acúmulo de magnésio na parte aérea da soja (Tabela 24). Em relação à forma de calagem, observou-se o mesmo comportamento das cultivares para o potássio. Já, em relação ao tratamento com a clagem superficial, as cultivares M 5917 IPRO e BRS 5980 IPRO apresentam as maiores médias, não diferindo entre si, porém diferindo de forma significativa das demais que são semelhantes.

Em um estudo, Reis et al. (2018) constataram a diminuição do acúmulo de Mg²⁺ na parte aérea da planta em função de concentrações de alumínio consideradas tóxicas.

Tabela 23. Acúmulo de magnésio na parte aérea da soja em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.

Cultivar	Mg ²⁺ (mg planta ⁻¹)		Média
	Calcário incorporado	Calcário superficial	
M 5917 IPRO	48 Aa	32 Ab	40 A
BRS 5980 IPRO	40 Ba	32 Ab	36 A
95R95 IPRO	32 Ca	24 Bb	28 B
BRS 7981 IPRO	30 Ca	30 ABa	30 B
Média	37 a	29 b	
CV (%)	0,1		

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% probabilidade. Transformação dos dados: Raiz quadrada de Y + 1.0 - SQRT (Y + 1.0).

Houve interação entre os fatores (calagem e cultivar) para o acúmulo de fósforo na parte aérea (Tabela 25). Em relação à forma de calagem, observa-se o mesmo comportamento das cultivares para o potássio e para o magnésio. No tratamento com a calagem incorporada a BRS 7981 IPRO apresenta a menor média e difere de forma significativa das demais que não diferem entre si. No tratamento com a calagem superficial, não se observou diferenças significativas entre as cultivares.

Os autores Viviani et al. (2010) observaram um efeito significativo do aumento do pH do solo sobre o acúmulo de fósforo na parte aérea da soja. A partir desses resultados, é possível compreender as diferenças médias entre a calagem incorporada e a calagem superficial, para os teores de fósforo, encontrados neste trabalho.

Tabela 24. Acúmulo de fósforo na parte aérea da soja em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.

Cultivar	P (mg planta ⁻¹)		Média
	Calcário incorporado	Calcário superficial	
M 5917 IPRO	46 Aa	32 Ab	39 A
BRS 5980 IPRO	36 ABa	32 Aa	34 A
95R95 IPRO	38 ABa	28 Ab	33 A
BRS 7981 IPRO	28 Ba	34 Aa	31 A
Média	37 a	31 b	
CV (%)	0,3		

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% probabilidade. Transformação dos dados: Raiz quadrada de Y + 1.0 - SQRT (Y + 1.0).

Houve interação entre os fatores (forma de calagem e cultivar) para o acúmulo de nitrogênio na parte aérea (Tabela 26). Em relação à forma de calagem, observou-se diferenças significativas entre todas as cultivares. No tratamento com a calagem incorporada a cultivar M 5917 IPRO apresenta a maior média em relação às demais, seguida das cultivares BRS 5980 IPRO e 95R95 IPRO que não diferem entre si. Por outro lado, a cultivar BRS 7981 IPRO apresenta a menor média. No tratamento com a calagem superficial, a M 5917 IPRO apresenta a maior média em relação às demais que não diferem entre si. Esse comportamento diferente entre cultivares, na mesma forma de calagem, pode estar relacionado ao fator genético.

Em um trabalho realizado em sistema hidropônico, Tolley-Henry e Raper (1986) constataram que o aumento da acidez da rizosfera provocou a diminuição do acúmulo de nitrogênio, na parte aérea da soja. Estes resultados encontrados estão de acordo com este trabalho, haja vista que a calagem superficial proporcionou um menor valor de pH (Tabela 8) e maior valor de Al³⁺, no solo (Tabela 9).

Tabela 25. Acúmulo de nitrogênio na parte aérea da soja em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.

Cultivar	N (mg planta ⁻¹)		Média
	Calcário incorporado	Calcário superficial	
M 5917 IPRO	418 Aa	296 Ab	357 A
BRS 5980 IPRO	304 Bca	244 Bb	274 BC
95R95 IPRO	350 Ba	242 Bb	296 B
BRS 7981 IPRO	264 Ca	222 Bb	243 C
Média	334 a	251 b	
CV (%)	1,0		

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% probabilidade. Transformação dos dados: Raiz quadrada de Y + 1.0 - SQRT (Y + 1.0).

4.7 Componentes de Produção da Soja

Houve interação (cultivar e calagem) para o número de nós por planta, (Tabela 27). Não foram observadas diferenças significativas entre as formas de calagem, apenas para a cultivar 95R95 IPRO. A cultivar que se destaca no tratamento com a calagem superficial é a M 5917 IPRO que difere significativamente das demais e que apresenta a maior média para a característica analisada. Por outro lado, no tratamento com a calagem incorporada, a cultivar BRS 7981 IPRO se destaca das demais, apresentando a maior média. Cabe destacar ainda que foram observadas nesse tratamento, diferenças significativas entre todas as cultivares. Provavelmente, essas diferenças encontradas estão relacionadas ao genótipo das cultivares.

Tabela 26. Número de nós em plantas de soja, em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.

Cultivar	Número de nós por planta		
	Calcário incorporado	Calcário superficial	Média
M 5917 IPRO	17 Cb	19 Ba	18 B
BRS 5980 IPRO	21 Ba	17 Cb	19 B
95R95 IPRO	18 Ca	18 BCa	18 B
BRS 7981 IPRO	25 Aa	22 Ab	23 A
Média	20 a	19 b	
CV (%)	2,0		

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% probabilidade. Transformação dos dados: Raiz quadrada de $Y + 1.0$ - SQRT ($Y + 1.0$).

Houve interação (cultivar e calagem) para o número de vagens por planta (Tabela 28). Observou-se diferenças entre todas as cultivares para as formas de calagem, com exceção da cultivar BRS 5980 IPRO. A calagem incorporada consistiu no melhor tratamento. Constatou-se também que há diferenças significativas entre as cultivares, destacando-se a M 5917 e a BRS 5980, com uma média de 144 e 119 vagens por planta, respectivamente, no tratamento com o calcário incorporado, não diferindo significativamente entre si, porém diferindo significativamente das demais, que apresentaram semelhanças entre si.

Em relação aos componentes de produção da soja, o número de vagens e a massa de grãos são os mais afetados pelo déficit hídrico (SANTOS et al., 2014). Estes autores observaram em um estudo realizado durante duas safras (2005/2006 e 2006/2007), na Embrapa Soja, Paraná, um efeito do déficit hídrico na fase reprodutiva, causando a diminuição do número de vagens da soja e o aumento da massa de 100 grãos. Apesar de ter havido uma média maior da massa de 100 grãos com o aumento do déficit hídrico, a produtividade diminuiu.

Em relação às cultivares, estes autores observaram que uma delas (BRS 184) se destacou das demais, apresentando a maior média para a produção de grãos, independente do déficit hídrico sofrido, durante as duas safras. Já, a cultivar BR 16 demonstrou ser sensível ao déficit hídrico, apresentando a menor média no rendimento de grãos, nas duas safras. Este resultado corrobora com o nosso trabalho para as diferenças encontradas entre as cultivares.

Segundo Rambo et al. (2003), o estresse hídrico diminui a produtividade da soja, mesmo quando ocorre no final do ciclo da cultura, principalmente pela diminuição da massa do grão. De acordo com Salinas et al. (1996), o déficit hídrico na fase reprodutiva reduziu o tamanho e a massa dos grãos da soja na maioria das cultivares estudadas.

O número de vagens por planta, número de grãos por vagens e peso médio dos grãos, são os principais componentes de produção da soja (JÚNIOR; COSTA, 2002). Em uma pesquisa por aumentos no rendimento dos grãos, o número de vagens por planta é o principal

componente a ser observado, devido a grande variação em que ocorre (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005). Esta informação corrobora com este trabalho, onde foi constatado diferenças significativas, para o número de vagens por planta, entre as duas formas de calagem.

Tabela 27. Número de vagens em plantas de soja, em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.

Cultivar	Número de vagens por planta		
	Calcário		Média
	Calcário incorporado	Calcário superficial	
M 5917 IPRO	144 Aa	47 Bb	96 A
BRS 5980 IPRO	119 ABa	95 Aa	107 A
95R95 IPRO	59 Ca	34 Bb	47 C
BRS 7981 IPRO	88 BCa	47 Bb	67 B
Média	103 a	56 b	
CV (%)	10,6		

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% probabilidade. Transformação dos dados: Raiz quadrada de $Y + 1.0 - \text{SQRT}(Y + 1.0)$.

Houve interação (cultivar e calagem) para o número de vagens sadias por planta (Tabela 29). Observou-se para todas as cultivares de soja, diferenças significativas em relação à forma de calagem, tendo o tratamento com a calagem incorporada apresentado as maiores médias. Foi constatado (observação pessoal) que muitas vagens apresentaram-se chochas, no tratamento com a calagem superficial e estas não foram contabilizadas como vagens sadias.

Há evidências de que a maior concentração de Al^{3+} na calagem superficial tenha interferido no processo de absorção de água, nutrientes, e na fotossíntese, contribuindo para um maior número de vagens chochas, em comparação com a calagem incorporada. Os autores Reis et al. (2018) corroboram com esta informação.

Tabela 28. Número de vagens sadias em plantas de soja, em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.

Cultivar	Número de vagens sadias por planta		
	Calcário		Média
	Incorporado	Superficial	
M 5917 IPRO	143 Aa	47 Bb	95 A
BRS 5980 IPRO	116 ABa	88 Ab	102 A
95R95 IPRO	58 Ca	33 Bb	46 B
BRS 7981 IPRO	81 Bca	45 Bb	63 B
Média	100 a	53 b	
CV (%)	10,4		

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% probabilidade. Transformação dos dados: Raiz quadrada de $Y + 1.0 - \text{SQRT}(Y + 1.0)$.

A análise estatística indicou que não houve interação entre fatores para o comprimento de vagens (Tabela 30). Porém, constatou-se diferença significativa em relação à forma de calagem, tendo a calagem incorporada apresentado a melhor média. Além disso, observou-se diferenças significativas entre as cultivares.

Tabela 29. Comprimento de uma vagem de soja, em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.

Cultivar	Comprimento de 1 vagem (cm)
M 5917 IPRO	4,26 A
BRS 5980 IPRO	3,98 B
95R95 IPRO	3,89 B
BRS 7981 IPRO	4,21 A
Calagem	Média
Calcário incorporado	4,16 A
Calcário superficial	4,01 B
CV (%)	3,2

Médias seguidas de mesma letra maiúsculas na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Constatou-se que não houve interação entre fatores para o número de grãos de uma vagem (Tabela 31). Observou-se também que não houve diferenças significativas para a forma de calagem. Porém, a cultivar BRS 7981 IPRO difere significativamente das demais, apresentando a menor média. Por outro lado, as outras cultivares não diferem significativamente entre si.

O número de grãos por vagens é um dos componentes que apresentam a menor variação, em diferentes manejos da cultura (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005). Este autor destaca que o melhoramento genético teve como objetivo a busca por plantas com produção de dois grãos por vagens, em média, mas alguns genótipos podem produzir até 3 grãos por vagens e raramente 4.

Tabela 30. Número de grãos de uma vagem de soja, em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.

Cultivar	Número de grãos de 1 vagem
M 5917 IPRO	2,8 A
BRS 5980 IPRO	2,7 A
95R95 IPRO	2,8 A
BRS 7981 IPRO	2,4 B
Calagem	Média
Calcário incorporado	2,6 A
Calcário superficial	2,7 A
CV (%)	3,8

Médias seguidas de mesma letra maiúsculas na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Foi observado que não houve interação entre fatores para a massa de 100 grãos (Tabela 32). Constatou-se diferença significativa para a forma de calagem, tendo a calagem incorporada apresentado a maior média para a característica analisada. Constatou-se também diferenças entre as cultivares, com destaque para a M 5917 IPRO que apresenta a maior média.

A massa do grão representa uma característica de cada cultivar, porém, podem ocorrer variações, de acordo com as condições ambientais e de manejo da cultura (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005).

Tabela 31. Massa de 100 grãos de soja (13% de umidade), em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.

Cultivar	Massa de 100 grãos (g)
	Média
M 5917 IPRO	17,3 A
BRS 5980 IPRO	11,1 C
95R95 IPRO	14,8 B
BRS 7981 IPRO	15,8 B
Calagem	Média
Calcário incorporado	16,2 A
Calcário superficial	13,2 B
CV (%)	6,9

Médias seguidas de mesma letra maiúsculas na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4.8 Produtividade da Cultura da Soja Entre as Duas Formas de Calagem

Não houve interação entre os fatores (cultivar de soja e forma de calagem), porém houve diferença significativa tanto entre cultivares quanto para a forma de calagem (Tabela 33). As cultivares apresentaram as maiores produtividades médias no tratamento com a calagem incorporada (Tabela 33). Na média geral, a maior produtividade de grãos foi observada para as cultivares M 5917 IPRO (3.253 kg ha⁻¹) e a BRS 5980 IPRO (3.165 kg ha⁻¹), que não diferiram estatisticamente, porém foram superiores significativamente das demais. Por outro lado, a cultivar 95R95 IPRO (2.763 kg ha⁻¹) superou significativamente a BRS 7981 IPRO (2.196 kg ha⁻¹). Observou-se em relação às cultivares, que somente a M 5917 IPRO (3.253 kg ha⁻¹) e a BRS 5980 IPRO (3.165 kg ha⁻¹) superaram a produtividade média nacional na safra 2021/2022 (3.029 kg ha⁻¹).

As demais cultivares produziram menos em relação à média nacional. Também foi observado que houve diferenças significativas entre as formas de calagem, com o melhor tratamento para a calagem incorporada ao solo (produtividade média das cultivares de 3.707 kg ha⁻¹) em comparação ao tratamento com a calagem superficial (produtividade média das cultivares de 1982 kg ha⁻¹).

Em um experimento de campo conduzido durante um período de 3 anos consecutivos na Fazenda Conquista, Município de Alvorada, Estado do Tocantins, em um Latossolo, constatou-se que a calagem incorporada ao solo proporcionou um aumento na massa seca da parte aérea, aumento na massa de 100 grãos, aumento do número de vagens por planta e aumento na produtividade de grãos (FAGERIA et al., 2013). Este autor observou o efeito significativo da aplicação da dose econômica de calcário (6 Mg ha⁻¹) no aumento da absorção de nutrientes (P, K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺), os quais tiveram um aumento na parte aérea na ordem de 14 %, 24%, 63 % e 27 %, respectivamente, comparado com o tratamento controle (sem calagem). Este efeito também foi observado para os grãos, com destaque para o nitrogênio que teve um aumento da ordem de 55 %. Neste trabalho ainda foi constatado que o número de vagens por planta é o componente mais importante no aumento do rendimento de grãos da soja, em comparação com outros componentes de crescimento e rendimento.

De acordo com estes autores, a absorção de N e P teve influência maior no rendimento de grãos em comparação com a absorção de K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} .

Em um trabalho, realizando-se uma análise 5 anos depois da calagem, constatou-se que a incorporação do calcário contribuiu para um aumento médio de 31 % na produtividade da soja, comparado com a aplicação do calcário em superfície (BORTOLUZZI et al., 2014).

As diferenças significativas de produtividade entre as cultivares, no tratamento onde a calagem foi realizada em superfície podem ser explicadas pela tolerância de genótipos à toxidez de alumínio em profundidade. Corroboram para essa informação, os resultados encontrados por Yu et al. (2011), que ao analisarem raízes de 2 genótipos de soja e observarem a atividade radicular, concluíram que um genótipo foi mais sensível ao alumínio do que outro.

Tabela 32. Produtividade da soja em experimento para comparação de formas de calagem na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes-RJ, safra 2021/2022.

Cultivar	Produtividade da soja (kg ha⁻¹)
M 5917 IPRO	3,253 A
BRS 5980 IPRO	3,165 A
95R95 IPRO	2,763 AB
BRS 7981 IPRO	2,196 B
Calagem	Média
Calcário incorporado	3,707 A
Calcário superficial	1,982 B
CV (%)	18,5

Médias seguidas de mesma letra maiúsculas na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

5. CONCLUSÕES

A calagem incorporada ao solo melhorou todos os atributos químicos do solo, muito embora tenha reduzido os teores de matéria orgânica. Além disso, a calagem incorporada ao solo promoveu maior massa de nódulos, maior acúmulo de N, Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+} e massa seca da parte aérea da cultura da soja. Constatou-se também que a calagem incorporada promoveu maior número de vagens por planta, maior massa e maior produtividade de grãos, de todas as cultivares de soja avaliadas.

A incorporação do calcário foi fundamental para o bom desempenho de todas as cultivares de soja avaliadas, nas condições edafoclimáticas da região de Campos dos Goytacazes, RJ, sobretudo na conversão de pastagens em lavoura.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A.; CAIRES, E. F. Atributos químicos de um Latossolo de cerrado sob plantio direto, de acordo com doses e formas de aplicação de calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 6, p. 923-934, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000600010>
- ALVES, B. J. R.; ZOTARELLI, L.; FERNANDES, F. M.; HECKLER, J. C.; MACEDO, R. A. T.; BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; URQUIAGA, S. Biological nitrogen fixation and nitrogen fertilizer on the nitrogen balance of soybean, maize and cotton. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 41, n. 3, p. 449-456, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000300011>
- ALVES, L. A.; AMBROSINI, V. G.; DENARDIN, L. G. de O.; FLORES, J. P. M.; MARTINS, A. P.; FILIPPI, D.; BREMM, C.; CARVALHO, P. C. de F.; FARIAS, G. D.; CIAMPITTI, I. A.; TIECHER, T. Biological N₂ fixation by soybeans grown with or without liming on acid soils in a no-till integrated crop-livestock system. **Soil and Tillage Research**, v. 209, p. 104923, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104923>
- BABALOLA, O. O. Beneficial bacteria of agricultural importance. **Biotechnology Letters**, v. 32, n. 11, p. 1559–1570, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10529-010-0347-0>
- BAGALE, S. Nutrient Management for Soybean Crops. **International Journal of Agronomy**, v. 2021, p. 1–10, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2021/3304634>
- BAQUY, M. A. Al; LI, J. yu; SHI, R. yong; KAMRAN, M. A.; XU, R. KOU. Higher cation exchange capacity determined lower critical soil pH and higher Al concentration for soybean. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 7, p. 6980–6989, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/S11356-017-1014-Y>
- BATAGLIA, O. C.; MASCARENHAS, H. A. A.; TEIXEIRA, J. P. F.; TISSELI F. °, O. Acúmulo de matéria seca e nutrientes, em soja cultivar Santa-Rosa. **Bragantia**, v. 35, n. 2, p. 237–247, 1976. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0006-87051976000200001>
- BOHRER, T. R. J.; HUNGRIA, M. Avaliação de cultivares de soja quanto à fixação biológica do nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 6, p. 15, 1998.
- BONATO, E. R.; BONATO, A. L. V. **A soja no Brasil: história e estatística**. Londrina: [s. n.], 1987.
- BORTOLUZZI, E. C.; PARIZE, G. L.; KORCHAGIN, J.; SILVA, V. R.; RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. Soybean root growth and crop yield in response to liming at the beginning of a no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 1, p. 262–271, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000100026>
- BRASIL. **Instrução Normativa SDA n.º 13 de 24/03/2011**. Aprova as normas sobre especificações, garantias, registro, embalagem e rotulagem dos inoculantes destinados à agricultura, bem como as relações dos micro-organismos autorizados e recomendados para produção de inoculantes no Brasil. , 2011. Disponível em: https://www.normasbrasil.com.br/norma/instrucao-normativa-13-2011_78540.html. Acesso em: 3 abr. 2023.

CAIRES, E. F.; FONSECA, A. F.; MENDES, J.; CHUEIRI, W. A.; MADRUGA, E. F. Produção de milho, trigo e soja em função das alterações das características químicas do solo pela aplicação de calcário e gesso na superfície, em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 2, p. 315–327, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-06831999000200016>

CASTRO, J. R. P. **Associação nacional dos produtores e importadores de inoculantes (ANPII, 2020)**. 2020. Disponível em: <http://www.anpii.org.br/wp-content/uploads/2020/06/Global-Fert-Inoculantes.pdf>. Acesso em: 9 mar. 2023.

CENTRO SUL ESPECIALISTA EM SEMENTES. **Manual cultivares Centro Sul 2021**. Passo Fundo-RS: Centro Sul Especialista em sementes, 2021. Disponível em: <https://www.centrosulcerais.com.br/site/innovative/img/pdf/manualcultivarescentrosul-2021.pdf>. Acesso em: 13 abr. 2023.

CIOTTA, M. N.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; FONTOURA, S. M. V.; ALBUQUERQUE, J. A.; WOBETO, C. Acidificação de um Latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 4, p. 1055-1064, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000400023>

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Informações Agropecuárias, Safras. Série Histórica das Safras. Soja, 2023**. [s. l.], 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras/itemlist/category/911-soja>. Acesso em: 19 jan. 2023.

DELAMUTA, J. R. M.; RIBEIRO, R. A.; ORMEÑO-ORRILLO, E.; MELO, I. S.; MARTÍNEZ-ROMERO, E.; HUNGRIA, M. Polyphasic evidence supporting the reclassification of *Bradyrhizobium japonicum* group Ia strains as *Bradyrhizobium diazoefficiens* sp. nov. **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, v. 63, n. Pt_9, p. 3342-3351, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1099/ijs.0.049130-0>

DELHAIZE, E.; RYAN, P. R. Aluminum Toxicity and Tolerance in Plants. **Plant Physiology**, v. 107, n. 2, p. 315-321, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1104/pp.107.2.315>

DÖBEREINER, J. Avanços recentes na pesquisa em fixação biológica de nitrogênio no Brasil. **Estudos Avançados**, v. 4, n. 8, p. 144-152, 1990. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0103-40141990000100011>

DOS SANTOS, D. R.; TIECHER, T.; GONZATTO, R.; SANTANNA, M. A.; BRUNETTO, G.; DA SILVA, L. S. Long-term effect of surface and incorporated liming in the conversion of natural grassland to no-till system for grain production in a highly acidic sandy-loam Ultisol from South Brazilian Campos. **Soil and Tillage Research**, v. 180, p. 222-231, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2018.03.014>

EEKHOUT, T.; LARSEN, P.; DE VEYLDER, L. Modification of DNA Checkpoints to Confer Aluminum Tolerance. **Trends in Plant Science**, v. 22, n. 2, p. 102-105, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.12.003>

EMATER-RJ. **Bovinocultura: pecuária de leite/corte**. Rio de Janeiro-RJ: EMATER-RJ, 2018. *E-book*. Disponível em: www.emater.rj.gov.br/areaTecnica/Bovi2018.pdf. Acesso em: 13 ago. 2022.

FAGERIA, N. K.; MOREIRA, A.; CASTRO, C.; MORAES, M. F. Optimal Acidity Indices for Soybean Production in Brazilian Oxisols. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 44, n. 20, p. 2941–2951, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.829484>

FAGERIA, N. K.; ZIMMERMANN, F. J. P. Influence of pH on growth and nutrient uptake by crop species in an Oxisol. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 29, n. 17–18, p. 2675–2682, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00103629809370142>

FERGUSON, B. J.; INDRASUMUNAR, A.; HAYASHI, S.; LIN, M.-H.; LIN, Y.-H.; REID, D. E.; GRESSHOFF, P. M. Molecular Analysis of Legume Nodule Development and Autoregulation. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 52, n. 1, p. 61–76, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2010.00899.x>

FERREIRA, M. C.; ANDRADE, D. S.; CHUEIRE, L. M. O.; TAKEMURA, S. M.; HUNGRIA, M. Tillage method and crop rotation effects on the population sizes and diversity of bradyrhizobia nodulating soybean. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 32, n. 5, p. 627–637, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00189-3](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00189-3)

FREIRE, L. R.; BALIEIRO, F. C.; ZONTA, E.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; LIMA, E.; GUERRA, J. G. M.; FERREIRA, M. B. C.; LEAL, M. A. A.; CAMPOS, D. V. B.; POLIDORO, J. C. **Manual de calagem e adubação do Estado do Rio de Janeiro**. Brasília, DF: Embrapa; Seropédica, RJ: Editora Universidade Rural, p. 430, 2013.

FURLANI, A. M. C. Nutrição mineral. In: KERBAUY, G. **Fisiologia Vegetal**. 3ª edição ed. Rio de Janeiro-RJ: Guanabara Koogan, p. 420, 2019.

GATIBONI, L. C.; SAGGIN, A.; BRUNETTO, G.; HORN, D.; FLORES, J. P. C.; RHEINHEIMER, D. dos S.; KAMINSKI, J. Alterações nos atributos químicos de solo arenoso pela calagem superficial no sistema plantio direto consolidado. **Ciência Rural**, v. 33, n. 2, p. 283–290, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782003000200016>

GLICK, B. R. **Beneficial Plant-Bacterial Interactions**. 1. ed. [S. l.]: Springer, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-13921-0>

GLICK, B. R.; GAMALERO, E. Recent Developments in the Study of Plant Microbiomes. **Microorganisms**, v. 9, n. 7, p. 1533, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/microorganisms9071533>

GOEDERT, W. J.; SCHERMACK, M. J.; FREITAS, F. C. Estado de compactação do solo em áreas cultivadas no sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 2, p. 223–227, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2002000200015>

GRAHAM, P. H. Stress tolerance in Rhizobium and Bradyrhizobium, and nodulation under adverse soil conditions. **Canadian Journal of Microbiology**, v. 38, n. 6, p. 475–484, 1992. Disponível em: <https://doi.org/10.1139/M92-079>

HARTEMINK, A. E.; BARROW, N. J. **Soil pH - nutrient relationships: the diagram**. [S. l.]: Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05861-z>

HUNGRIA, M.; CAMPO, R. J.; MENDES, I. C. **A importância do processo de fixação biológica do nitrogênio para a cultura da soja: componente essencial para a competitividade do produto brasileiro.** Londrina-PR: Embrapa Soja, p. 80, 2007. Documentos.Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/468512>. Acesso em: 11 abr. 2023.

HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; CAMPO, R. J.; CRISPINO, C. C.; MORAES, J. Z.; SIBALDELLI, R. N. R.; MENDES, I. C.; ARIHARA, J. Nitrogen nutrition of soybean in Brazil: Contributions of biological N₂ fixation and N fertilizer to grain yield. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 86, n. 4, p. 927–939, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.4141/P05-098>

HUNGRIA, M.; LOUREIRO, M. F.; MENDES, I. C.; CAMPO, R. J.; GRAHAM, P. H.; CORREA, F. Inoculant preparation, production and application. In: WERNER, D.; NEWTON, W. E. **Nitrogen Fixation in Agriculture, Forestry, Ecology, and the Environment.** [S. l.]: Springer Science & Business Media, 2005.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A. Fixação biológica do nitrogênio. In: MEYER, M. C.; BUENO, A. F.; MAZARO, S. M. **Bioinsumos na cultura da soja.** Brasília-DF: EMBRAPA, 2022.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de Dados Meteorológicos do INMET (BDMEP).** , 2022. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 20 jun. 2022.

JORIS, H. A. W.; CAIRES, E. F.; BINI, A. R.; SCHARR, D. A.; HALISKI, A. Effects of soil acidity and water stress on corn and soybean performance under a no-till system. **Plant and Soil**, v. 365, n. 1–2, p. 409–424, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1413-2>

JUNIOR, A. O.; CASTRO, C.; OLIVEIRA, F. A.; KLEPKER, D. Fertilidade do solo e avaliação do estado nutricional da soja. In: SEIXAS, C. D. S.; NEUMAIER, N.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; KRZYZANOWSKI, F. C.; LEITE, R. M. V. B. C. **Tecnologias de produção de soja.** 17. 1ª ed. Londrina-PR: Embrapa Soja, p. 347, 2020. *E-book*. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/223209/1/SP-17-2020-online-1.pdf>. Acesso em: 19 jan. 2023.

KAMINSKI, J.; SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; SILVA, L. S. Eficiência da calagem superficial e incorporada precedendo o sistema plantio direto em um argissolo sob pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 4, p. 573–580, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000400010>

KASEKER, J. F.; ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A.; GERBER, J. M.; ROSA, E. de F. F. Distribuição das formas de potássio no solo em decorrência da aplicação de calcário. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 21, n. 1, p. 35–46, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5965/223811712112022035>

LASTOCHKINA, O.; GARSHINA, D.; ALLAGULOVA, C.; PUSENKOVA, L.; GARIPOVA, S.; MASLENNIKOVA, D.; FEDOROVA, K.; SHPIRNAYA, I.; IBRAGIMOV, A.; KORYAKOV, I.; SAKHAPOVA, A.; YULDASBAEVA, G.; DMITRIEVA, A.; SOBHANI, M.; ALINIAEIFARD, S. Potential Aspects of Plant Growth Promoting Bacteria to

Improve Horticultural Crop Production. **International Journal of Horticultural Science and Technology**, v. 8, n. 2, p. 103–122, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.22059/ijhst.2020.314562.422>

LIMA, D. V.; KLIEMANN, H. J.; FAGERIA, N. K.; MORAES, M. F.; LEANDRO, W. M.; SEVERIANO, E. C. Saturação por alumínio e relação Al/Ca para a cultura da soja em solos de cerrado. **Revista Agricultura Tropical**, v. 7, n. 1, p. 106–118, 2003.

LIU, A.; CONTADOR, C. A.; FAN, K.; LAM, H. M. **Interaction and regulation of carbon, nitrogen, and phosphorus metabolisms in root nodules of legumes**. [S. l.]: Frontiers Media S.A., 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01860>

LOURENÇÃO, A. L. F.; BEZERRA, A. R. G.; MELOTTO, A. M.; GITTI, D. C.; GRIGOLLI, J. F. J. **Tecnologia e produção: Safra 2017/2018**. Curitiba-PR: Midiograf, 2018. *E-book*. Disponível em: <https://www.fundacaoms.org.br/wp-content/uploads/2021/02/httpswww.fundacaoms.org.brpublicacoestecnologia-e-producao-safratecnologia-producao-soja-2017-2018.pdf>. Acesso em: 19 jan. 2023.

MALAVOLTA, E. - ABC da Adubação. Editora Agronômica CERES Ltda. São Paulo (SP), p. 256, 1979.

MARSCHNER, H. Mechanisms of adaptation of plants to acid soils. **Plant and Soil** **1991** **134:1**, v. 134, n. 1, p. 20, 1991. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00010712>

MATSUMOTO, H. Cell biology of aluminum toxicity and tolerance in higher plants. **International Review of Cytology**, v. 200, p. 1–46, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0074-7696\(00\)00001-2](https://doi.org/10.1016/S0074-7696(00)00001-2)

MEYER, G.; BELL, M. J.; DOOLETTE, C. L.; BRUNETTI, G.; ZHANG, Y.; LOMBI, E.; KOPITKE, P. M. Plant-Available Phosphorus in Highly Concentrated Fertilizer Bands: Effects of Soil Type, Phosphorus Form, and Coapplied Potassium. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 68, n. 29, p. 7571–7580, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c01287>

MORETTI, L. G.; CRUSCIOL, C. A. C.; KURAMAE, E. E.; BOSSOLANI, J. W.; MOREIRA, A.; COSTA, N. R.; ALVES, C. J.; PASCOALOTO, I. M.; RONDINA, A. B. L.; HUNGRIA, M. Effects of growth-promoting bacteria on soybean root activity, plant development, and yield. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 1, p. 418–428, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/AGJ2.20010>

MUNDSTOCK, C. M.; THOMAS, A. L. **Soja: fatores que afetam o crescimento e o rendimento de grãos**. Porto Alegre: Departamento de Plantas de Lavoura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. p. 31, 2005.

JÚNIOR, H. M. N.; COSTA, J. A. Contribuição relativa dos componentes do rendimento para produção de grãos em soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 3, p. 269–274, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2002000300006>

PERKINS, E. G. Composition of Soybeans and Soybean Products. *In: Practical Handbook of Soybean Processing and Utilization*. [S. l.]: Elsevier, 1995. p. 9–28. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-935315-63-9.50006-1>. Acesso em: 6 abr. 2023.

PETREIRE, C.; ANGHINONI, I. Alteração de atributos químicos no perfil do solo pela calagem superficial em campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 4, p. 885–895, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000400011>

PORTAL EMBRAPA. **Soja BRS 5980IPRO**. [s. l.], 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/4958/soja-brs-5980ipro>. Acesso em: 13 abr. 2023.

PREZOTTI, L. C.; MARTINS, A. G. **Guia de Interpretação de análise de Solo e Foliar**. Vitória, ES: Incaper, p. 104, 2013. Disponível em: <https://biblioteca.incaper.es.gov.br/digital/bitstream/item/40/1/Guia-interpretacao-analise-solo.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2023.

QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. van; GALLO, P. B.; MASCARENHAS, H. A. A. Respostas da soja à aplicação de calcário e gesso e lixiviação de íons no perfil do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 28, n. 3, p. 375–383, 1993.

RAMBO, L.; COSTA, J. A.; PIRES, J. L. F.; PARCIANELLO, G.; FERREIRA, F. G. Rendimento de grãos da soja em função do arranjo de plantas. **Ciência Rural**, v. 33, n. 3, p. 405–411, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782003000300003>

RAMPIM, L.; LANA, M. C.; FRANDOLOSO, J. F.; FONTANIVA, S. Atributos químicos de solo e resposta do trigo e da soja ao gesso em sistema semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1687–1698, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000500023>

REIS, A. R. dos.; LISBOA, L. A. M.; REIS, H. P. G.; BARCELOS, J. P. DE Q.; SANTOS, E. F.; SANTINI, J. M. K.; VENÂNCIO MEYER-SAND, B. R.; PUTTI, F. F.; GALINDO, F. S.; KANEKO, F. H.; BARBOSA, J. Z.; PAIXÃO, A. P.; JUNIOR, E. F.; DE FIGUEIREDO, P. A. M.; LAVRES, J. Depicting the physiological and ultrastructural responses of soybean plants to Al stress conditions. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 130, p. 377–390, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.07.028>

RHEINHEIMER, D. S.; SANTOS, E. J. S.; KAMINSKI, J.; BORTOLUZZI, E. C.; GATIBONI, L. C. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 4, p. 797–805, 2000 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832000000400012>

RHEINHEIMER, D. S.; SANTOS, E. J. S.; KAMINSKI, J.; XAVIER, F. M. Aplicação superficial de calcário no sistema plantio direto consolidado em solo arenoso. **Ciência Rural**, v. 30, n. 2, p. 263–268, 2000 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782000000200011>

SALINAS, A.; ZELENER, N.; CRAVIOTTO, R.; BISARO, V. Respuestas fisiologicas que caracterizan el comportamiento de diferentes cultivares de soja a la deficiencia hidrica en el suelo. *In: 1996, Anais [...]. [S. l.: s. n.]* Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Respuestas-fisiologicas-que-caracterizan-el-de-de-a-Salinas-Zelener/e8d3cfa5088298048156da0715ad9dcfe713602c>. Acesso em: 4 abr. 2023.

SANTOS, D. R.; TIECHER, T.; GONZATTO, R.; SANTANNA, M. A.; BRUNETTO, G.; SILVA, L. S. Long-term effect of surface and incorporated liming in the conversion of natural grassland to no-till system for grain production in a highly acidic sandy-loam Ultisol from South Brazilian Campos. **Soil and Tillage Research**, v. 180, p. 222–231, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.03.014>

SANTOS, E. L.; CATTELAN, A. J.; PRETE, C. E. C.; NEUMAIER, N.; OLIVEIRA, M. . C. N.; FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L. Níveis de Disponibilidade Hídrica sobre Componentes de Produção e Rendimento de Cultivares de Soja. **Global Science and Technology**, v. 7, n. 3, p. 1–11, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.14688/1984-3801/gst.v7n3p1-11>

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. Sistema Brasileiro de Classificação de solos. 5. ed. revista e ampliada. Brasília, DF: Embrapa, p. 590, 2018.

SANTOS, M. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. **Microbial inoculants: reviewing the past, discussing the present and previewing an outstanding future for the use of beneficial bacteria in agriculture.** [S. l.]: Springer, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13568-019-0932-0>

SANTOS, M. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Outstanding impact of azospirillum brasilense strains ab-v5 and ab-v6 on the brazilian agriculture: Lessons that farmers are receptive to adopt new microbial inoculants. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 45, p. 31, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.36783/18069657RBCS20200128>

SANTOYO, G.; GAMALERO, E.; GLICK, B. R. Mycorrhizal-Bacterial Amelioration of Plant Abiotic and Biotic Stress. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, p. 672881, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.672881>

SANTOS, A. D.; COSCIONE, A. R.; VITTI, A. C.; BOARETTO, A. E.; COELHO, A. M.; RAIJ, B. V.; SILVA, C. A.; JUNIOR, C. H. A.; CARMO, C. A. F. S.; SILVA, C. R.; ABREU, C. A.; GIANELLO, C.; ANDRADE, C. A.; PÉREZ, D. V.; CASARINI, D. C. P.; SILVA, F. C.; PRATA, F.; CARVALHO, F. C.; SANTOS, G. C. G.; CANTARELLA, H.; FERNANDES, H. M. G.; ANDRADE, J. C.; QUAGGIO, J. A.; CHITOLINA, J. C.; CUNHA, L. M. S.; PAVAN, M. A.; ROSIAS, M. F. G. G.; TEDESCO, M. J.; MIYAZAWA, M.; ABREU, M. F.; EIRA, P. A.; HIGA, R. H.; MASSRUHÁ, S. M. F. S.; GOMES, T. F.; MURAOKA, T.; VIEIRA, W.; MELO, W. J.; BARRETO, W. O. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Rio de Janeiro-RJ: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. p. 627. *E-book*. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/330496>. Acesso em: 3 abr. 2023.

SILVA, G. T. A.; RESENDE, A. S.; CAMPELLO, E. F. C.; DIAS, P. F.; FRANCO, A. A. **O papel da fixação biológica de nitrogênio na sustentabilidade de sistemas agroflorestais**. Seropédica-RJ: Embrapa Agrobiologia, p. 36, 2007. Documentos. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/629386/o-papel-da-fixacao-biologica-de-nitrogenio-na-sustentabilidade-de-sistemas-agroflorestais>. Acesso em: 4 abr. 2023.

SOBRAL, L. F.; BARRETO, M. C. V.; SILVA, A. J. da; ANJOS, J. L. dos. **Guia Prático para Interpretação de Resultados de Análises de Solo**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, p. 13, 2015. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1042994/1/Doc206.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2023.

SOTO-URZÚA, L.; BACA, B. E. Mecanismos de protección de la nitrogenasa a la inactivación por oxígeno. **Revista Latinoamericana de Microbiología**, v. 43, p. 37–49, 2001.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; MIRANDA, L. N. **Correção do solo e adubação da cultura da soja**. Planaltina: DF: EMBRAPA-CPAC, 1996. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/551684/1/cirtec33.pdf>. Acesso em: 25 out. 2022.

SOUZA, M. A. S.; FAQUIN, V.; GUELF, D. R.; OLIVEIRA, G. C.; BASTOS, C. E. A. Acúmulo de macronutrientes na soja influenciado pelo cultivo prévio do capim-marandu, correção e compactação do solo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 4, p. 611–622, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902012000400001>

STREDO, G. J. **calagem e adubação da Soja**. 1. ed. Londrina, PR: [s. n.], 2008. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/470943/calagem-e-adubacao-da-soja>. Acesso em: 15 ago. 2023.

TOLLEY-HENRY, L.; RAPER, C. D. Utilization of Ammonium as a Nitrogen Source Effects of Ambient Acidity on Growth and Nitrogen Accumulation by Soybean. **Plant Physiology**, v. 82, n. 1, p. 54–60, 1986. Disponível em: <https://doi.org/10.1104/PP.82.1.54>

VIVIANI, C. A.; MARCHETTI, M. E.; VITORINO, A. C. T.; NOVELINO, J. O.; GONÇALVES, M. C. Disponibilidade de fósforo em dois latossolos argilosos e seu acúmulo em plantas de soja, em função do aumento do pH. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 1, p. 61–67, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542010000100007>

YU, H. N.; LIU, P.; WANG, Z. Y.; CHEN, W. R.; XU, G. D. The effect of aluminum treatments on the root growth and cell ultrastructure of two soybean genotypes. **Crop Protection**, v. 30, n. 3, p. 323–328, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2010.11.024>

ZILLI, J. E.; BATISTA, J. N.; GUARESCHI, R. F.; ZITO, R. K. **Avaliação de cultivos de soja no norte fluminense**. Rio de Janeiro-RJ: Embrapa Agrobiologia, 2022. Documentos. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1147196/1/Avaliacao-de-cultivos-de-soja-no-Norte-Fluminense.pdf>. Acesso em: 24 out. 2022.

ZILLI, J. E.; CAMPO, R. J.; GIANLUPPI, V.; HUNGRIA, M. **Nodulação e Rendimento de Grãos da Cultura da Soja no Cerrado de Roraima em Função do Tratamento de Sementes com Fungicidas**. Boa Vista-RR: EMBRAPA Roraima, p. 16, 2009. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/696605/1/bp152009sojazilli.pdf>. Acesso em: 19 jan. 2023.

ZILLI, J. É.; GIANLUPPI, V.; CAMPO, R. J.; ROUWS, J. R. C.; HUNGRIA, M. Inoculação da soja com *Bradyrhizobium* no sulco de semeadura alternativamente à inoculação de sementes.

Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 34, n. 6, p. 1875–1881, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-06832010000600011>

ZILLI, J. E.; POLIDORO, J. C.; ALVES, B. J. R.; LUMBRERAS, J. F. **Produção da soja e do milho como um caminho para o desenvolvimento do agronegócio da Região Norte Fluminense**. Rio de Janeiro-RJ: EMBRAPA Solos, 2021. Documentos. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1131690/producao-da-soja-e-do-milho-como-um-caminho-para-o-desenvolvimento-do-agronegocio-da-regiao-norte-fluminense>. Acesso em: 19 jan. 2023.

7. ANEXOS

7.1 Anexo A - Solo da Área de Experimento com Soja no Norte Fluminense

Perfil: Abd-2

Número de campo: Abd-2

DESCRIÇÃO GERAL

DATA DA DESCRIÇÃO – 24/09/2020.

CLASSIFICAÇÃO – NEOSSOLO FLÚVICO Tb Distrófico típico, textura média/arenosa, A moderado, endoálico, fase floresta tropical subperenifólia de várzea, relevo plano com microrrelevo suave.

LOCALIZAÇÃO – Tradagem situada na Fazenda Abadia, no lado esquerdo da rodovia vicinal e a cerca de 4,0 km desta, sentido Campos dos Goytacazes - Gargaú, a 11,5 km da primeira, município de Campos dos Goytacazes, estado do Rio de Janeiro. Coordenadas: 21° 41' 47,0" S e 41° 13' 23,2" W (datum WGS 84).

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL – Trincheira situada em área de planície aluvionar do Rio Paraíba do Sul, em condição de microrrelevo local ligeiramente subcôncavo (deprimido), com 0% a 2% de declividade, sob pastagem de *Brachiaria ruziziense*.

ALTITUDE – 6 metros.

LITOLOGIA, UNIDADE LITOESTRATIGRÁFICA E CRONOLOGIA – Sedimentos fluviais argiloarenosos/arenosos do Holoceno.

MATERIAL ORIGINÁRIO – Produto da alteração de sedimentos argiloarenosos/arenosos.

PEDREGOSIDADE – Não pedregosa.

ROCHOSIDADE – Não rochosa.

RELEVO LOCAL – Plano com microrrelevo suave.

RELEVO REGIONAL – Plano.

EROSÃO – Não aparente.

DRENAGEM – Moderadamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Floresta tropical subperenifólia de várzea.

USO ATUAL – Pastagem de *Brachiaria ruziziense*.

CLIMA – Aw, tropical com inverno seco, segundo a classificação de Köppen (1936).

DESCRITO E COLETADO POR – José Francisco Lumbreras, Josimar Nogueira Batista e Willy Pedro Vasconcelos Prellwitz.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Tradagem

- Ap 0 - 10 cm, bruno muito escuro (10YR 2/2), mosqueado raro, pequeno e difuso, bruno-forte (7YR 4/6) (de raízes); francoarenosa; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
- AC 10 - 35 cm, bruno-acinzentado-muito-escuro (10YR 3/2), mosqueado raro, pequeno e difuso, bruno-forte (7YR 4/6) (de raízes); francoarenosa; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa.
- C1 35 - 50 cm, bruno-amarelado-escuro (7,5YR 3/2), mosqueado raro, pequeno e difuso, bruno-forte (7YR 4/6) (de raízes); francoarenosa; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa.
- 2C2 50 - 90 cm, bruno-claro-acinzentado (10YR 4/6); areia franca; não plástica e não pegajosa.
- 2C3 90 - 140 cm⁺, coloração variegada composta por cinzento-claro (10YR 6/4); areia; não plástica e não pegajosa.

OBSERVAÇÕES:

- Perfil ligeiramente úmido (choveu nos dois dias anteriores).
- Camada de textura arenosa a 70 cm de profundidade em tradagem situada na gleba vizinha (em posição ligeiramente mais elevada no micro relevo e com melhor condição de drenagem), evidenciando a elevada variabilidade espacial dos solos nesta área.
- Perfil descrito em mini trincheira com 30 cm de profundidade e aprofundado com trado.
- Coletadas 5 amostras para análises físicas e químicas de rotina.
- Estima-se AD em torno de 0,7 mm/cm da superfície até 50 cm de profundidade; e em torno de 0,4-0,5 mm/cm entre 50 e 140 cm de profundidade.
- Não há restrições físicas ao desenvolvimento radicular.
- Eventualmente pode ocorrer encharcamento por curtos períodos nas posições mais baixas do micro relevo devido às chuvas intensas.

7.2 Anexo B - Análise Mineralógica e Química de Solo

Perfil: Abd-2
Número de campo: Abd-2 (Formosa)
Amostras de laboratório: 6 - 10 (Fundenor)

Horizonte		Frações da amostra total g kg ⁻¹			Composição granulométrica da terra fina g kg ⁻¹				Argila dispersa em água g kg ⁻¹	Grau de flocul. %	Relação silte/ argila	Densidade kg dm ⁻³		Porosidade m ³ m ⁻³
Símbolo	Profund. cm	Calh. >20 mm	Casc. 20-2 mm	Terra fina <2 mm	Areia grossa 2-0,2 mm	Areia fina 0,2-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila <0,002 mm				Solo	Partíc.	
Ap	0 - 10	-	-	-	6	687	83	68	-	-	0,42	-	-	-
AC	- 35	-	-	-	7	678	82	97	-	-	0,68	-	-	-
C1	- 50	-	-	-	8	685	85	40	-	-	0,21	-	-	-
2C2	- 90	-	-	-	9	740	134	42	-	-	0,50	-	-	-
2C3	- 140 ⁺	-	-	-	10	774	112	67	-	-	1,43	-	-	-
Símbolo	pH (1:2,5)			Complexo sortivo cmol _c kg ⁻¹							Valor V %	Saturação por alumínio %	P disponível mg kg ⁻¹	
	Água	KCl 1 N	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Valor S	Al ³⁺	H ⁺	Valor T				
Ap	4,4	-	1,6	0,7	0,27	0,12	2,8	0,4	3,8	7,0	39	14	12	
AC	4,2	-	1,0	0,4	0,06	0,06	1,5	0,9	3,7	6,1	25	37	2	
C1	4,2	-	0,6	0,2	0,04	0,04	0,8	1,2	2,5	4,4	18	59	2	
2C2	4,5	-	0,4	0,1	0,03	0,03	0,5	0,6	0,9	2,0	27	52	3	
2C3	4,4	-	0,4	0,2	0,04	0,09	0,7	0,6	1,0	2,3	30	46	3	
Símbolo	C org. g kg ⁻¹	N g kg ⁻¹	Relação C/N	Ataque sulfúrico g kg ⁻¹						Relações moleculares			Fe ₂ O ₃ livre g kg ⁻¹	Equivalente de CaCO ₃ g kg ⁻¹
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ (Ki)	SiO ₂ /R ₂ O ₃ (Kr)	Al ₂ O ₃ /Fe ₂ O ₃		
Ap	8,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
AC	6,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
C1	3,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2C2	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2C3	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

7.3 Anexo C – Área do Experimento

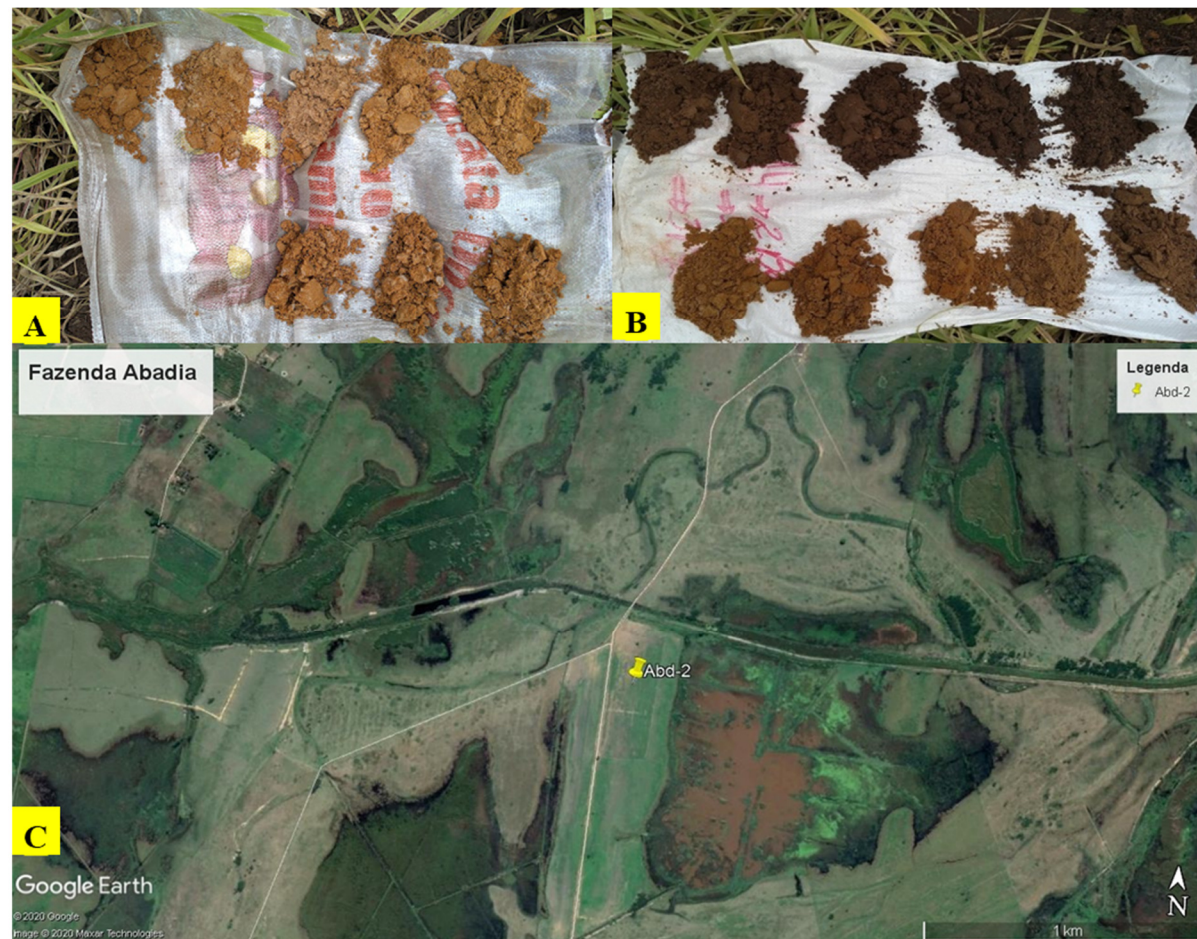


Figura 5. Localização do experimento de soja na Fazenda Abadia, Campos dos Goytacazes, RJ.