UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
UNESP | BOTUCATU

JOÃO WILLIAM BOSSOLANI

LIME AND PHOSPHOGYPSUM IN LONG-TERM NO-TILL: SOIL QUALITY IMPROVING CROP PHYSIOLOGY AND ^{15}N-FERTILIZER RECOVERY IN THE SOIL-PLANT SYSTEM

Botucatu

2022

JOÃO WILLIAM BOSSOLANI

LIME AND PHOSPHOGYPSUM IN LONG-TERM NO-TILL: SOIL QUALITY IMPROVING CROP PHYSIOLOGY AND ^{15}N-FERTILIZER RECOVERY IN THE SOIL-PLANT SYSTEM

Thesis presented to São Paulo State University, College of Agricultural Sciences, to obtain Doctor of Philosophy degree in Agronomy (Crop Science).

Adivisor: Prof. Dr. Carlos Alexandre Costa Crusciol

Co-advisor: Dr^{a}. Nídia Raquel Costa

Botucatu

2022

B745l

Bossolani, João William

Lime and phosphogypsum in long-term no-till: soil quality improving crop physiology and 15N-fertilizer recovery in the soil-plant system / João William Bossolani. -- Botucatu, 2022

251 p. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu

Orientador: Carlos Alexandre Costa Crusciol

Coorientadora: Nídia Raquel Costa

1. soil acidity. 2. root deepening. 3. soil microbiology. 4. nitrogen cycle. 5. (15NH4)2SO4. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu

FCA
Faculdade de Ciências Agronômicas
UNESP | BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: LIME AND PHOSPHOGYPSUM IN LONG-TERM NO-TILL: SOIL QUALITY IMPROVING CROP PHYSIOLOGY AND 15N-FERTILIZER RECOVERY IN THE SOIL-PLANT SYSTEM

AUTOR: JOÃO WILLIAM BOSSOLANI
ORIENTADOR: CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL
COORIENTADORA: NÍDIA RAQUEL COSTA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL (Participaçao Presencial)
Producao e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciencias Agronomicas de Botucatu

Prof. Dr. JULIANO CARLOS CALONEGO (Participaçao Virtual)
Producao Vegetal / Faculdade de Ciencias Agronomicas de Botucatu UNESP

Prof. Dr. EDUARDO FÁVERO CAIRES (Participaçao Virtual)
Ciência do Solo e Engenharia Agrícola / Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof. Dr. FERNANDO DINI ANDREOTE (Participaçao Virtual)
Ciência do Solo / Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz

Prof. Dr. RAFAEL OTTO (Participaçao Virtual)
Ciência do Solo / Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz

Botucatu, 28 de junho de 2022

Dedico esta tese de doutorado aos meus pais João Nelson e Benedita, aos meus irmãos Bruno (*in memoriam*) e Ellen, e ao meu avô Nelson (*in memoriam*), por teram me demonstrado a verdadeira definição de amor, honestidade, dignidade, sacrifício e dedicação, que ajudaram a me tornar a pessoa que sou hoje. Que cada uma das minhas conquistas seja a realização de seus próprios sonhos.

AGRADECIMENTOS

Ao nosso bom Deus por sempre mostrar o caminho e a verdade, e por nos conceder o privilégio da vida (mesmo que as vezes efêmera).

A minha família: Benedita José Oliveira Bossolani (mãe), João Nelson Bossolani (pai), Bruno Henrique Bossolani (*In memoriam*; irmão), Ellen Rita Bossolani (irmã), Nelson Bossolani (*In memoriam*; avô), por sempre me incentivarem a seguir adiante, rumo aos meus sonhos, e por me confortarem e serem meu alicerce nessa vida. Meu muito obrigado do fundo do meu coração. É tudo por vocês.

À Mariley Fonseca, pelo amor, paciência, incentivo, companheirismo e compreensão, tornando possível a consolidação deste trabalho e da manutenção da minha sanidade mental. Agradeço à Deus por tê-la em minha vida.

Agradeço imensamente ao meu orientador e amigo, Dr. Carlos Alexandre Costa Crusciol. É um exemplo ímpar de ser humano e professor. Cada passo dado durante o doutorado foi guiado pelos seus exemplos e ensinamentos. Obrigado pela confiança, incentivo e paciência durante todo este período de orientação. Manifesto aqui minha eterna gratidão pela grande contribuição em minha vida profissional e pessoal nestes anos de convivência; foi uma grande oportunidade e um privilégio para mim.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, no período entre 01/03/2018 à 31/07/2018.

Um agradecimento especial à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de estudos (de 01/09/2018 à 30/06/2022) e por todo apoio financeiro (processos: 2018/11063-7 e 2019/12764-1). Obrigado pelo incentivo a ciência.

Agradeço imensamente à Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, em especial aos professores e funcionários do Departamento de Produção Vegetal pela dedicação e atenção com os alunos. São exemplos de pessoas e profissionais.

Gostaria de agradecer ao Instituto de Ecologia da Holanda (NIOO-KNAW), especialmente ao Departamento de Ecologia Microbiana e à Dra. Eiko E. Kuramae. Obrigado pela oportunidade ter sido seu aprendiz, por lapidar meus conhecimentos, e por me tornar um cientista melhor. Ainda, estendo meus agradecimentos ao meu amigo Marcio Leite; obrigado por todas dicas e ensinamentos, pela paciência, e pela importante amizade construída durante o intercâmbio.

Um agradecimento especial ao meu amigo Luiz G. Moretti, por ter sido meu guia desde 2011. Não poderia ter encontrado pessoa melhor para dividir aprendizados, conquistas, dias bons e ruins e, claro, as "buchas" do dia-a-dia. Obrigado do fundo do meu coração.

Partindo da premissa de que não chegamos a lugar algum sozinhos, gostaria de agradecer à todos meus amigos e colegas de trabalho da UNESP/FCA: José R. Portugal, Vitor A. Rodrigues, Tatiani M. Galeriani, Sirlene L. Oliveira, Gabriel O. Neves, Andressa S. Dalla Côrt, Letusa Momesso, Israel A. Filho, Gabriela F. Siqueira, Ariani Garcia, Rafael Vilela, Leila Bernart, Nídia R. Costa, Murilo de Campos, Rafael Neres, Fernanda M. Souza, Lucas M. Jacomassi, Marcela P. Oliveira, Josiane A. V. Oliveira, Letícia P. Mendonça, Isabô M. Pascoaloto, entre outros que participaram desta jornada, pessoas que certamente levarei em minhas lembranças. Peço a Deus que os abençoe em suas respectivas caminhadas por este mundo. Obrigado por toda a ajuda na condução deste trabalho e por terem tornado meus dias melhores.

Aos integrantes da equipe de estagiários, pela demonstração da importância do trabalho em grupo, evidenciando que a união entre pessoas determinadas pode gerar grandes obras, além de comunhão e amizade.

À banca avaliadora pela disposição e tempo dedicado a esse trabalho.

Aos meus amigos de morada, Thiago B. Batista e Gustavo R. F. Oliveira. Obrigado pelos bons momentos de risada, sempre regados de aprendizado. Vocês são exemplos de como cientistas devem ter amor e zelo por aquilo que fazem.

Aos meus amigos de longa data, que apesar da distância, sempre mantiveram-se presentes: Alexandre Pedrinho, Luis F. Merlotti e Flávia C. Meirelles. Meu muito obrigado por tudo.

“Aqueles que se sentem satisfeitos sentam-se e nada fazem. Os insatisfeitos são os únicos benfeitores do mundo”

Walter S. Landor

ABSTRACT

The present study is part of a long-term experiment, started in 2002, at Fazenda Experimental Lageado, belonging to the College of Agricultural Sciences (UNESP/FCA), in Botucatu (SP). Continuing the experiment, which is likely to be the only one in the State of São Paulo with such a duration (19 years), the present Thesis aimed to understand the effect of long-term surface application of lime and phosphogypsum on the soil chemical and biological attributes, root growth, plant nutrition, carbon e antioxidant metabolism, ^{15}N-fertilizer recovery in the soil-plant system, and yield of maize intercropped with ruzigrass and soybean in succession. The field part of this study has been carried out since October 2016, when lime and/or phosphogypsum were last applied. Therefore, here we tested the following treatments: *i*) control (no soil amendments applied), *ii*) phosphogypsum alone, *iii*) lime alone and, *iv*) lime and phosphogypsum combination. Soybean sowing occurred between November and December of each year, whereas maize intercropped with ruzigrass was sown in March of each year. Our results suggested that the combination of lime and phosphogypsum proved to be effective in improving soil fertility up to 1 m depth, reflecting ideal conditions for root growth of soybean and maize intercropped with ruzigrass. As a result of these changes, crop nutrition was also improved, ensuring high photosynthetic metabolism even when periods of water scarcity occurred. In the combined application of lime and phosphogypsum, antioxidant metabolism based on free radical-consuming enzymes also increased, reducing lipid peroxidation of leaf cells. This cascading effect was reflected in the increase in grain yield of both crops. Deepening the understanding of tropical agricultural systems altered by the application of lime and phosphogypsum, our microbiological studies revealed that the joint application of lime and phosphogypsum altered the soil chemical properties in a no-till intercropped system, increasing the relative abundance of total prokaryotes (archaea and bacteria), modulating genes related to the nitrogen cycle. Finally, our results also revealed that the combined application of these inputs increases the recovery of ^{15}N fertilizer [$(^{15}NH_4)_2SO_4$] by maize and ruzigrass in intercropping, and soybean cultivated in crop rotation, which reduced N losses to the environment. Our study highlighted the importance of using soil amendments in tropical agricultural systems, mainly in exploring the synergistic effect of lime with phosphogypsum, aiming to improve the soil chemical and microbiological quality, the nitrogen fertilizer recovery, the photosynthetic and antioxidant metabolism of plants and, consequently, the grain yield of the crops.

Keywords: soil acidity; root deepening; soil microbiology; nitrogen cycle; $(^{15}NH_4)_2SO_4$.

RESUMO

O presente estudo faz parte de um experimento de longa duração, instalado no ano de 2002, na Fazenda Experimental Lageado, pertencente à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP, em Botucatu (SP). Dando continuidade ao experimento, que provavelmente deve ser o único do Estado de São Paulo com tamanha duração (19 anos), a presente tese objetivou entender o efeito da aplicação superficial de calcário e gesso à longo prazo sobre os atributos químicos e biológicos do solo, crescimento radicular, nutrição das plantas, metabolismos do carbono e antioxidante, recuperaçao do ^{15}N-fertilizante no sistema solo-planta, e produtividade de milho consorciado com *Urochloa ruziziensis* e a soja em sucessão. A parte de campo deste estudo vem sendo conduzida desde outubro de 2016, momento em que foi aplicada pela última vez o calcário e/ou gesso. Portanto, aqui testamos os seguintes tratamentos: *i*) controle (sem aplicação de corretivos do solo), *ii*) gesso, *iii*) calcário e, *iv*) combinação de calcário e gesso. As semeaduras da soja ocorreram entre novembro e dezembro de cada ano, enquanto que o milho consorciado com *Urochloa ruziziensis* foi semeado no mês de março de cada ano. Nossos resultados sugeriram que a combinação de calcário e gesso foi eficaz em melhorar a fertilidade do solo até 1 m de profundidade, refletindo condições ideais para o crescimento radicular de soja e milho consorciados com *U. ruziziensis*. Como resultado dessas mudanças, a nutrição das culturas também foi melhorada, garantindo alto metabolismo fotossintético mesmo quando ocorreram períodos de escassez hídrica. Na aplicação combinada de calcário e gesso, o metabolismo antioxidante baseado em enzimas consumidoras de radicais livres também aumentou, reduzindo a peroxidação lipídica das células foliares. Esse efeito cascata refletiu-se no aumento da produtividade de grãos de ambas as culturas. Aprofundando a compreensão dos sistemas agrícolas tropicais alterados pela aplicação de calcário e gesso, nossos estudos microbiológicos revelaram que a aplicação conjunta destes insumos alterou as propriedades químicas do solo em um sistema de plantio direto consorciado, aumentando a abundância relativa de procariontes totais (archaea e bactérias), modulando genes relacionados ao ciclo do nitrogênio. Por fim, nossos resultados também revelaram que a aplicação combinada desses insumos aumenta a recuperação do ^{15}N fertilizante [$(^{15}NH_4)_2SO_4$] pelo milho e *U. ruziziensis* cultivados em consórcio, e da soja cultivada sucessão, o que reduziu fortemente as perdas de N para o meio ambiente. Nosso estudo destacou a importância do uso de corretivos do solo em sistemas agrícolas tropicais, principalmente na exploração do efeito sinérgico do calcário com o gesso, visando melhorar a qualidade química e microbiológica do solo, a recuperação de fertilizantes nitrogenados, o metabolismo fotossintético e antioxidante das plantas e, consequentemente, a produtividade de grãos das lavouras.

Palavras-chave: acidez do solo; aprofundamento radicular; microbiologia do solo; ciclo do nitrogênio; $(^{15}NH_4)_2SO_4$.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Supplementary material

Supplementary material

LISTA DE TABELAS

SUMMARY

GENERAL INTRODUCTION

Soil acidity is one of the most limiting factors for crop development by reducing its productive potential. Approximately 50% of the arable area across the globe is affected by problems related to soil acidity (SUMNER; NOBLE, 2003; VON UEXKÜLL; MUTERT, 1995). Most of these soils are located in tropical and subtropical regions, as they present a high degree of weathering, which promotes acidity problems, reduced cation exchange capacity (CEC) and base saturation (BS), in addition to containing high levels of toxic elements such as exchangeable aluminum (Al^{3+}) (CAIRES *et al.*, 2008; CAIRES *et al.*, 2011; CRUSCIOL *et al.*, 2016; FAGERIA; NASCENTE, 2014; LI *et al.*, 2019). Brazil, one of the largest food producers in the world, has about 58% of its territory naturally acidic, which becomes a major problem especially in low-altitude Cerrado, a Biome with predisposition to dry winters and summers with dry spell periods (CUNNINGHAM, 2020).

Liming is a very important practice for the viability of agricultural production, since this operation can neutralize soil acidity, increasing nutrient availability, in addition to providing calcium (Ca^{2+}) and magnesium (Mg^{2+}), and reducing Al^{3+} toxicity, especially at uppermost soil layers. On the other hand, the no-tillage system (NTS) requires no tilling of the soil, reducing liming efficiency (CAIRES; GARBUIO; BARTH, 2008; SANTOS *et al.*, 2018). In this type of production system, liming is usually carried out on the soil surface, without incorporation, promoting great inquiries in the scientific environment due to low low mobility in the profile (low solubility in water) (SORATTO; CRUCIOL, 2008).

Due to the issues that occurs in surface application of lime, studies with phosphogypsum has started. Phosphogypsum is a by-product of obtaining phosphoric acid, basically composed of calcium sulfate ($CaSO_4.2H_2O$). This input, unlike lime, does not correct soil acidity; however it is an alternative in providing Ca^{2+} at deep layers, in addition to reducing Al^{3+} toxic levels throughout the soil profile (CARMEIS FILHO; CRUSCIOL; CASTILHOS, 2017; CRUSCIOL *et al.*, 2019; SORATTO; CRUSCIOL, 2008). Phosphogypsum solubility is higher compared with lime (~150 times), and thus, moving more quickly through the soil profile (COSTA *et al.*, 2018; TIRITAN *et al.*, 2016). Phosphogypsum, therefore, has been used as a complementary input to lime, enhancing the liming benefits to the soil (BOSSOLANI *et al.*, 2020; CRUSCIOL *et al.*, 2019). On the other hand, there are many formulas for recommending phosphogypsum for Brazilian soils (CAIRES; GUIMARÃES, 2018; VAN RAIJ *et al.*, 2001; VITTI; LUZ, 2004), requiring further investigation as to the best method for each type of agricultural system and soil.

In addition to the benefits for soil chemical attributes, the application of lime, combined or not with phosphogypsum, can also improve soil physics (soil structure), although this effect is not yet fully understood (CARMEIS FILHO *et al.*, 2017; ROTH; PAVAN, 1991). Regarding microbiological indicators of soil quality, the effect of lime and phosphogypsum management has not yet been elucidated, and contradictory results are often obtained, mainly due to the spatial heterogeneity and complexity of the system (BADALUCCO *et al.*, 1992). These results become more incipient when changes occur only over long-term periods (CUSSER *et al.*, 2020; DUVAL *et al.*, 2013).

Liming can increase soil microbial activity (BOSSOLANI *et al.*, 2020; HOLLAND *et al.*, 2018). As a rule, raising the soil pH, increases the mineralization of soil organic matter, in addition to providing a direct impact on the nitrogen cycle potential of soils (BOSSOLANI *et al.*, 2020; HOLLAND *et al.*, 2018). Studies in tropical regions evaluating the effect of lime and phosphogypsum on the soil microbiological activity and structure are scarce, and further investigations are necessary, given the importance of microbiology in increasing the productivity of soil and crops (BOSSOLANI *et al.*, 2021a). Therefore, understanding the effect of these inputs on soil quality is important to predict changes in soil productive balance and the long-term sustainability, and profitability of agricultural systems (GROVER *et al.*, 2017; INAGAKI *et al.*, 2016), especially in tropical region. Furthermore, soil fertility management with lime and phosphogypsum can be used as an important tool to overcome periods of water scarcity (BOSSOLANI *et al.*, 2021b). Tropical regions presents stronlgy predisposition to dry periods throughout the year CARMEIS FILHO *et al.*, 2017, which drastically reduce crop yield. The construction of a fertile profile ensures increased root growth of crops, accessing a greater amount of soil resources (water and nutrients), which leads crops to overcome periods of drought (BOSSOLANI *et al.*, 2021b)

Therefore, this research aimed to evaluate the effect of surface application of lime and phosphogypsum on the combination of soil chemical with physical and biological properties (functional genes and taxonomical profile), root growth, plant nutrition, carbon and antioxidant metabolism, yield components, and the ^{15}N-fertilizer recovery by crops in the soil-plant system.

GENERAL CONCLUSIONS

Our results advances the understanding of the dynamics of surface lime application and the combined effect of lime and phosphogypsum in the different aspects that make up a long-term tropical no-till system. Our results showed that the application of lime alone and especially in combination with phosphogypsum improves soil fertility up to 1 m deep, culminating in increased root growth of soybean and maize crops. As a result, both crops increased the leaf nutrient concentrations, reflecting an improvement in the concentration of leaf photosynthetic pigments, and gas exchange (net photosynthetic rate, stomatal conductance, substomatal concentration of CO_2, leaf transpiration and water use efficiency), and on the activities of Rubisco and SuSy enzymes. Interestingly, when studying the water balance during the soybean and maize growing cycle, we confirmed periods of water scarcity, and when lime and phosphogypsum were applied, drought stress (measured through antioxidant enzymes and lipid peroxidation) reduced. Crop grain yield was also increased with liming, and even more expressive results occurred by the combination of lime and phosphogypsum. Interestingly, soil microbiology highly contributed to the understanding of the dynamics of soil-plant relationship of this study. The productive responses of soybean and maize did not occur only due to changes in the soil chemical properties. Deepening the understanding of tropical agricultural systems altered by the application of lime and phosphogypsum, our results revealed that the joint application of these inputs changed the soil chemical properties in tropical intercropping system managed under no-till, increasing the relative abundance of total prokaryotes (archaea and bacteria), modulating genes related to the nitrogen cycle. Exchangeable Ca^{2+} and Mg^{2+} were the main nutrients related to the increase of genes related to nitrogen fixation and to the reduction of the relative abundance of genes related to nitrification and denitrification (even though the total abundance increased), for both soil and rhizospheres of maize and ruzigrass. In addition, the synergism between lime and phosphogypsum also increased the quantity and quality of soil organic matter, mainly by altering the relationship between bacteria and fungi communities of the soil. Interestingly, we found that soil improvers act by modifying soil quality at a hierarchical level as follows: soil fertility > microbiome (fungi + bacteria) > chemical fractions of soil organic matter > soil physics > physical fractions of soil organic matter. Finally, our results also revealed that the combined application of these inputs has a strong influence on the selection of microorganisms that are not abundant in the soil (rare community), reflecting a potential increase in the multifunctionality of the soil. Our results also showed that the increase in the abundance of related genes in soils managed with lime and phosphogypsum favors the recovery of ^{15}N fertilizer, which strongly reduces the losses of nitrogen fertilizer. On the other hand, we saw that the isolated use of phosphogypsum has a potential to leaching N to deep layers. In the absence of the management with lime and phosphogypsum (control treatment), the abundance of genes related to denitrification has increased, which indicates a high potential for denitrification in these soils, increasing even more the N losses in the system.

REFERENCES

BADALUCCO, L.; GREGO, S.; DELL'ORCO, S.; NANNIPIERI, P. Effect of liming on some chemical, biochemical, and microbiological properties of acid soils under spruce (Picea abies L.). **Biology and Fertility of Soils**, v. 14, p. 76-83, 1992.

BOSSOLANI, J. W.; CRUSCIOL, C. A. C.; LEITE, M. F. A.; MERLOTI, L. F.; MORETTI, L. G.; PASCOALOTO, I. M.; KURAMAE, E. E. Modulation of the soil microbiome by long-term Ca-based soil amendments boosts soil organic carbon and physicochemical quality in a tropical no-till crop rotation system. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 156, 108188, 2021a. DOI: https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108188

BOSSOLANI, J. W.; CRUSCIOL, C. A. C.; GARCIA, A.; MORETTI, L. G.; PORTUGAL, J. R.; RODRIGUES, V. A.; FONSECA, M. C.; CALONEGO, J. C.; CAIRES, E. F.; AMADO, T. J. C.; REIS, A. R. D. Long-term lime and phosphogypsum amended-soils alleviates the field drought effects on carbon and antioxidative metabolism of maize by improving soil fertility and root growth. **Frontiers in Plant Science**, 1437, 2021b. https://doi.org/ 10.3389/fpls.2021.650296.

BOSSOLANI, J. W.; CRUSCIOL, C. A. C.; MERLOTI, L. F.; MORETTI, L. G.; COSTA, N. R.; TSAI, S. M.; KURAMAE, E. E. Long-term lime and gypsum amendment increase nitrogen fixation and decrease nitrification and denitrification gene abundances in the rhizosphere and soil in a tropical no-till intercropping system. **Geoderma**, n. 375, 114476, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114476

CAIRES, E. F.; GARBUIO, F. J.; BARTH, G. Surface application of lime and cover black oat and corn residues for no-till soybean production. Communications in Soil **Science and Plant Analysis**, v. 39, p. 2102-2118, 2008. DOI: https://doi.org/10.1080/00103620802135138

CAIRES, E. F.; GUIMARÃES, A. M. A novel phosphogypsum application recommendation method under continuous no-till management in Brazil. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 5, p. 1987-1995, 2018. DOI: https://doi.org/10.2134/agronj2017.11.0642

CAIRES, E. F.; HENRIQUE, E.; MASCHIETTO, G.; JOSÉ, F.; CHURKA, S.; ANTONIO, H.; JORIS, W. Surface application of gypsum in low acidic Oxisol under no-till cropping system. **Scientia Agrícola**, n. 2, p. 209-216, 2011.

CAIRES, E. F.; PEREIRA FILHO, P. R. S.; ZARDO FILHO, R.; FELDHAUS, I. C. Soil acidity and aluminium toxicity as affected by surface liming and cover oat residues under a no-till system. **Soil Use and Management**, v. 24, n. 3, p. 302-309, 2008.

CARMEIS FILHO, A. C. A.; CRUSCIOL, C. A. C.; CASTILHOS, A. M. Liming demand and plant growth improvements for an Oxisol under long-term no-till cropping. **Journal of Agricultural Science**, v. 155, n. 7, p. 1093-1112, 2017. DOI: https://doi.org/10.1017/S0021859617000235

CARMEIS FILHO, A. C. A.; CRUSCIOL, C. A. C.; GUIMARÃES, T. M.; CALONEGO, J. C.; MOONEY, S. J. Impact of amendments on the physical properties of soil under tropical long-term no till conditions. **PLoS One**, v. 12, n. 2, 27959897, 2017. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0173011

COSTA, C. H. M.; CARMEIS FILHO, A. C. A.; CRUSCIOL, C. A. C.; SORATTO, R. P.; GUIMARÃES, T. M. Intensive annual crop production and root development in a tropical acid soil under long-term no-till and soil-amendment management. **Crop and Pasture Science**, v. 69, n. 5, 488-505, 2018. DOI: https://doi.org/10.1071/CP17233

CRUSCIOL, C. A. C.; MARQUES, R. R.; CARMEIS FILHO, A. C. A.; SORATTO, R. P.; COSTA, C. H. M.; FERRARI NETO, J.; CASTRO, G. S. A.; PARIZ, C. M.; CASTILHOS, A. M.; FRANZLUEBBERS, A. J. Lime and gypsum combination improves crop and forage yields and estimated meat production and revenue in a variable charge tropical soil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 115, p. 347-372, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s10705-019-10017-0

CRUSCIOL, C. A. C.; MARQUES, R. R.; FILHO, A. C. A. C.; SORATTO, R. P.; COSTA, C. H. M.; NETO, J. F.; CASTRO, G. S. A.; PARIZ, C. M.; DE CASTILHOS, A. M. Annual crop rotation of tropical pastures with no-till soil as affected by lime surface application. **European Journal of Agronomy**, v. 80, p. 88-104, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.07.002

CUNNINGHAM, C. Characterization of dry spells in Southeastern Brazil during the monsoon season. **International Journal of Climatology**, v. 40, n. 10, p. 4609-4621, 2020. DOI: https://doi.org/10.1002/joc.6478

CUSSER, S.; BAHLAI, C.; SWINTON, S. M.; ROBERTSON, G. P.; HADDAD, N. M. Long-term research avoids spurious and misleading trends in sustainability attributes of no-till. **Global Change Biology**, v. 26, n. 6, p. 3715-3725, 2020. DOI: https://doi.org/10.1111/gcb.15080

DUVAL, M. E.; GALANTINI, J. A.; IGLESIAS, J. O.; CANELO, S.; MARTINEZ, J. M.; WALL, L. Analysis of organic fractions as indicators of soil quality under natural and cultivated systems. **Soil and Tillage Research**, v. 131, p. 11-19, 2013.

FAGERIA, N. K.; NASCENTE, A. S. Management of soil acidity of South American soils for sustainable crop production. **Advances in Agronomy**, v. 128, p. 221-275, 2014. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-802139-2.00006-8.

GROVER, S. P.; BUTTERLY, C. R.; WANG, X.; TANG, C. The short-term effects of liming on organic carbon mineralisation in two acidic soils as affected by different rates and application depths of lime. **Biology and Fertility of Soils**, v. 53, p. 431-443, 2017. DOI: https://doi.org/10.1007/s00374-017-1196-y

HOLLAND, J. E.; BENNETT, A. E.; NEWTON, A. C.; WHITE, P. J.; MCKENZIE, B. M.; GEORGE, T. S.; PAKEMAN, R. J.; BAILEY, J. S.; FORNARA, D. A.; HAYES, R. C. Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK: A review. **Science of the Total Environment**, v. 610-611, p. 316–332, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.020

INAGAKI, T. M.; DE MORAES SÁ, J. C.; CAIRES, E. F.; GONÇALVES, D. R. P. Lime and gypsum application increases biological activity, carbon pools, and agronomic productivity in highly weathered soil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 231, p. 156-165, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.034

LI, Y.; CUI, S.; CHANG, S. X.; ZHANG, Q. Liming effects on soil pH and crop yield depend on lime material type, application method and rate, and crop species: a global meta-analysis. **Journal of Soils and Sediments**, v. 19, n. 3, p. 1393–1406, 2019.

ROTH, C. H.; PAVAN, M. A. Effects of lime and gypsum on clay dispersion and infiltration in samples of a Brazilian Oxisol. **Geoderma**, v. 48, n. 3-4, p. 351-361, 1991. DOI: https://doi.org/10.1016/0016-7061(91)90053-V

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. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2018.03.014

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Dolomite and phosphogypsum surface application effects on annual crops nutrition and yield. **Agronomy Journal**, v. 100, n. 2, p. 261-270, 2008. DOI: https://doi.org/10.2134/agronj2007.0120

SUMNER, M. E.; NOBLE, A. D. Soil acidification: the world story. *In:* RENGEL, Z. **Handbook of soil acidity**. New York: Marcel Dekker, 2003. p. 1-28.

TIRITAN, C. S.; BÜLL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C.; CARMEIS FILHO, A. C. A.; FERNANDES, D. M.; NASCENTE, A. S. Tillage system and lime application in a tropical region: Soil chemical fertility and corn yield in succession to degraded pastures. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 437-447, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2015.06.012

VAN RAIJ, B.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001.

VITTI, G. C.; LUZ, P. H. C. **Utilização agronômica de corretivos agrícolas**. Piracicaba: FEALQ/GAPE, 2004.

VON UEXKÜLL, H. R.; MUTERT, E. Global extent, development and economic impact of acid soils. **Plant and Soil**, v. 171, p. 1-15, 1995. DOI: https://doi.org/10.1007/BF00009558