

**Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Tecnossolos construídos: uma “*Nature Based Solution*” para  
mitigação de mudanças climáticas**

**Beatriz Marchese Silva**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestra em Ciências. Área de concentração: Solos e  
Nutrição de Plantas

**Piracicaba  
2023**

**Beatriz Marchese Silva**  
**Engenheira Agrônoma**

**Tecnossolos construídos: uma “*Nature Based Solution*” para mitigação de mudanças climáticas**

Orientador:  
Prof. Dr. **TIAGO OSÓRIO FERREIRA**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestra em Ciências. Área de concentração: Solos e  
Nutrição de Plantas

**Piracicaba**  
**2023**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Silva, Beatriz Marchese

Tecnossolos construídos: uma *"Natured Based Solution"* para mitigação de mudanças climáticas / Beatriz Marchese Silva. - - Piracicaba, 2023.

102 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Solos antropogênicos 2. Resíduos sólidos 3. Gramíneas tropicais 4. Recuperação de áreas degradadas 5. Mecanismos de estabilização de matéria orgânica I. Título

## RESUMO

### **Tecnossolos construídos: uma “*Nature Based Solution*” para mitigação de mudanças climáticas**

O uso inadequado do solo intensificou sua degradação e perda em escala global. O impacto das atividades humanas, principalmente do setor mineral e da construção civil, altera significativamente as paisagens naturais, resultando em impactos ambientais de difícil recuperação, em especial, dos solos em áreas onde estas atividades ocorrem. Neste contexto, solos construídos utilizando resíduos sólidos, conhecidos como Tecnossolos, apresentam-se como uma alternativa viável de "Nature Based Solutions (NBS) - Soluções Baseadas na Natureza" para reduzir os efeitos prejudiciais dessas atividades e exercerem funções ecossistêmicas específicas (i.e., servir como substrato para crescimento de pastagem; estabilização de matéria orgânica do solo - MOS). Sendo assim, este estudo teve como objetivo avaliar o desenvolvimento de gramíneas tropicais, e, analisar a estabilização da MOS (por meio de interações organo-minerais) em Tecnossolos construídos com rejeitos de minério de ferro (RMF) e resíduos de construção civil (RCC), em um experimento conduzido por quatro meses em campo. Foram elaborados quatro tipos de Tecnossolos com diferentes proporções: TEC60;40– 60% RMF e 40% RCC; TEC70;30 – 70% RMF e 30% RCC; TEC80;20- 80% RMF e 20 % RCC; TEC100 - 100% RMF em vasos de 100 litros onde foi cultivado *Urochloa brizantha* cv. Marandu. A fim de comparar o desenvolvimento das plantas, o incremento de carbono orgânico do solo (COS) e os mecanismos de estabilização da MOS, foi utilizado um Latossolo Vermelho-Amarelo como tratamento Controle. Após o fim do experimento, os Tecnossolos construídos apresentaram produção de biomassa aérea total 3,3 vezes maior do que aquelas presentes no tratamento Controle ( $251\pm 77$  g), com uma média de  $825\pm 270$  g de biomassa aérea. Adicionalmente, apresentaram incrementos de carbono orgânico no solo (COS) em média de  $185\pm 70\%$  a mais em relação ao valor inicial, enquanto o Controle apresentou  $23\pm 22\%$ . A maior produção de biomassa aérea pode estar vinculada às condições químicas favoráveis do Tecnossolos, tais como os maiores valores de pH, CTC e SB. Também foi observado concentrações mais elevadas de macronutrientes essenciais, como Ca, P, Mg e K nos Tecnossolos, os quais foram essenciais para o crescimento das plantas. O maior incremento de COS nos Tecnossolos pode estar diretamente relacionado ao maior crescimento das gramíneas, as quais possuem intensa ciclagem e atividade das raízes que aportaram altas concentrações de COS nestes solos. A presença de COS juntamente com a presença de óxidos de alta cristalinidade e cátions de Ca, formaram complexos ternários com o COS, apresentando um papel crucial na estabilidade da MOS para os Tecnossolos.

Palavras-chave: Recuperação de áreas degradadas, Solos antropogênicos, Resíduos sólidos, Estabilização da matéria orgânica do solo.

## ABSTRACT

### **Constructed Technosols: a “Nature Based Solution” for climate change mitigation**

The inappropriate use of soil has intensified its degradation and loss on a global scale. The impact of human activities, especially in the mining and construction sectors, significantly alters natural landscapes, resulting in environmentally damaging effects, particularly on soils in areas where these activities occur. In this context, soils constructed using solid waste, known as Technosols, emerge as a viable alternative for "Nature Based Solutions (NBS)" to mitigate the detrimental effects of these activities and provide specific ecosystem functions (e.g., serving as a substrate for pasture growth, stabilizing soil organic matter - SOM). Therefore, this study aimed to evaluate the development of tropical grasses and analyze the stabilization of SOM (through organo-mineral interactions) in Technosols constructed with iron ore tailings (IOT) and construction and demolition waste (CDW) in a four-month field experiment. Four types of Technosols were prepared with different proportions: TEC60;40 - 60% IOT and 40% CDW; TEC70;30 - 70% IOT and 30% CDW; TEC80;20 - 80% IOT and 20% CDW; TEC100 - 100% IOT in 100-liter pots where *Urochloa brizantha* cv. Marandu was cultivated. To compare plant development, soil organic carbon (SOC) increments, and SOM stabilization mechanisms, a Red-Yellow Latosol was used as the Control treatment. After the experiment, the constructed Technosols showed a total aboveground biomass production 3.3 times higher than that of the Control treatment ( $251\pm77$  g), with an average of  $825\pm270$  g of aboveground biomass. Additionally, they exhibited significantly higher increments of soil organic carbon (SOC), averaging  $185\pm70\%$  more compared to the initial value, while the Control treatment showed  $23\pm22\%$ . The greater aboveground biomass production may be linked to favorable chemical conditions of the Technosols, such as higher pH, CEC, and base saturation. Higher concentrations of essential macronutrients, such as Ca, P, Mg, and K, were also observed in the Technosols, which were crucial for plant growth. The higher increment of SOC in the Technosols could be directly related to the increased growth of grasses, which exhibit intense root cycling and activity, leading to high concentrations of SOC in these soils. The presence of SOC, along with highly crystalline oxides and Ca cations, formed ternary complexes with SOC, playing a crucial role in SOM stability for Technosols.

**Keywords:** Degraded land restoration, Anthropogenic soils, Solid waste, Soil organic matter stabilization.



## INTRODUÇÃO GERAL

O uso inadequado do solo intensifica sua degradação e perda em escala mundial. Dados globais apontam para um cenário onde 33% dos solos já se encontram degradados devido, principalmente a erosão, salinização, compactação, acidificação e contaminação (FAO, 2015). Esses impactos vêm sendo associados à atividades antrópicas que alteram significativamente as paisagens naturais, resultando em processos de degradação de difícil recuperação (SANDERSON et al., 2002; DE KIMPE & MOREL, 2007; CAPRA et al., 2015; FAO, 2015).

No Brasil, por exemplo, essas atividades estão associadas principalmente aos setores de mineração e construção civil, já que o país se destaca como um dos maiores exploradores de minério do mundo, uma produção em cerca de 1,05 bilhão de toneladas por ano (IBRAM, 2022) e um dos países que mais gera resíduos sólidos na América Latina (ABRELPE, 2022), o que geram um extenso volume de resíduos que frequentemente são deixados em pilhas abandonadas sem valor econômico (RILEY E GARDINER, 1991; ESPÓSITO, 2000).

O crescimento e desenvolvimento da industrialização, urbanização e mineração durante o século XX, resultou em transformações significativas na pedosfera revelando o ser humano, também, como um fator de formação do solo (DUDAL, 2005). Neste contexto são reconhecidos os “solos antropogênicos”, cujos processos pedogenéticos derivam de atividades antrópicas (ROSSITER, 2007), pelo fato de dificilmente serem encontradas localizações geográficas onde não houve modificação, reorganização ou transporte de solo como consequência da ação humana, sobretudo, devido à grande demanda da humanidade por recursos naturais (CAPRA et al., 2015). Cabe ressaltar, entretanto, que estes locais de intensa exploração antrópica podem desempenhar funções importantes no ecossistema, principalmente, após sua recuperação espontânea ou intencional (GREINERT et al., 2013b; KABALA et al., 2020).

Sob essa ótica, a World Reference Base for Soil Resources (WRB-FAO) reconheceu e integrou no seu sistema taxonômico, táxons adequados para classificar os solos antrópicos sob a denominação de Antrossolos e Tecnossolos (IUSS WORKING GROUP WRB, 2006). De acordo com esse sistema, os Antrossolos são aqueles solos resultantes de atividades de uso e manejo, isto é, pela gênese de horizontes antrópicos a partir da adição ou incorporação de materiais orgânicos ou inorgânicos pelo ser humano (NACHTERGAELE, 2005).

Em contrapartida, os Tecnossolos são caracterizados por uma dominância ou forte influência de materiais tecnogênicos, chamados de artefatos que são materiais modificados ou criados pelas ações humanas que não ocorreriam de forma natural no ecossistema, como

por exemplo, lixo doméstico, cinzas, lodos de estação de tratamento de água e esgoto, rejeitos de mineração e resíduos de construção civil (HUOT et al., 2015; RODRÍGUEZ-VILA et al., 2016; ASENSIO et al., 2019; RUIZ et al., 2020).

Os Tecnosolos são definidos como solos contendo 20% ou mais de materiais tecnogênicos em camada superior a 100 cm; ou pela presença de uma camada com material rígido ou conter geomembrana (IUSS WORKING GROUP WRB 2006), e abarcam também os solos desenvolvidos abaixo de pavimentos, provindos de rejeitos e aqueles construídos de forma artificial para fins de recuperação ambiental (IUSS WORKING GROUP WRB, 2014).

Os Tecnosolos construídos artificialmente ou espontaneamente a partir de diferentes resíduos sólidos (urbanos, rejeitos industriais, de mineração), com objetivos específicos, podem ser uma alternativa para o combate da degradação de solos e de recuperação de áreas degradadas (ASENSIO et al., 2014, HAFEEZ et al., 2012; SÉRÉ et al., 2010). Essa abordagem se enquadra no conceito de “Nature Based Solutions (NBS) - Soluções Baseadas na Natureza” (MAES & JACOBS, 2017), um conceito definido como soluções inspiradas e suportadas pela natureza que possuem como objetivo recuperar, proteger e aumentar a resiliência dos ecossistemas naturais através de estratégias eficientes que garantam um desenvolvimento sustentável e de bem-estar humano, diminuindo impactos ambientais negativos gerados por atividades antrópicas (UICN–SUL, 2019). O empenho para aprimorar a natureza a fim de auxiliar os ecossistemas a enfrentarem os desafios ambientais provindos do desenvolvimento acelerado da sociedade (SEDDON & CHAUSSON, et al., 2020; SEDDON et al., 2019) facilitou a compreensão e o envolvimento da NBS em diversos setores, atraindo pesquisadores, formuladores de políticas e profissionais em mudanças climáticas, biodiversidade e desenvolvimento (COHEN-SHACHAM ET AL., 2019; VAN HAM & KLIMMEK, 2017).

Empregar solos construídos ou gerenciados de forma inteligente como substratos com capacidade de desempenhar funções específicas ainda é limitado e requer avanços para a sua ampliação (ASENSIO et al., 2014; ASENSIO et al., 2013b; PÁRRAGA-AGUADO et al., 2017; RODRÍGUEZ-VILA et al., 2016; RODRÍGUEZ et al., 2018). Ademais, este conceito demanda maior compreensão dos riscos associados à saúde humana e ao ecossistema, em razão da possibilidade de conter materiais tecnogênicos com altos níveis de elementos potencialmente tóxicos e outros contaminantes (HATTAB et al., 2015; LEBRUN et al., 2017). Assim, apesar de pesquisas mostrarem o potencial do uso de Tecnosolos em diferentes perspectivas ambientais, o uso dessa técnica como uma Nature Based Solution ainda necessita de maior investigação principalmente devido o potencial de



aplicação no cenário nacional. Desse modo, o presente estudo tem como objetivo geral avaliar o potencial de Tecnossolos construídos a partir de resíduos de minério de ferro e construção civil, como uma NBS para recuperação de áreas degradadas. Além disso, os objetivos específicos deste trabalho foram: i) avaliar o potencial dos Tecnossolos construídos em atuar como substrato para o crescimento de gramíneas tropicais; (ii) analisar a eficiência de Tecnossolos construídos em estabilizar matéria orgânica do solo por meio do estabelecimento de interações organo-minerais.

## Referências

- Asensio, V.; Veja, F.A.; Covelo, E.F. Effect of soil reclamation process on soil C fractions. *Chemosphere*, 95 (2014), pp. 511-518.
- Asensio, V.; Veja, F.A.; Andrade, M.L.; Covelo, E.F. Tree vegetation and waste amendments to improve the physical condition of copper mine soils. *Chemosphere*, 90 (2013), pp. 603-610.
- Asensio, V., Guala, S.D., Vega, F.A., Covelo, E.F., 2013. A soil quality index for reclaimed mine soils. *Environ. Toxicol. Chem.* 32, 2240–2248.
- Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE. *Panorama Nacional dos Resíduos Sólidos 2022*. São Paulo, 2022.
- Capra, G. F; Ganga, A.; Grilli, E.; Vacca, S.; Buondonno, A. A review on anthropogenic soils from a worldwide perspective. *J Soils Sediments* 15, 1602–1618 (2015).
- De Kimpe; Morel, J. L. Urban Soil Management: A Growing Concern. In: *Soil Science*, v. 165, p. 31-44, 2007.
- Dudal, R., 2005. The sixth factor of soil formation. *Eurasian Soil Science C/C of Pochvovedenie*, 38, S60.
- Espósito, T.J. (2000). Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeitos construídas por aterro hidráulico. Tese de doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 359 p
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Status of the World's Soil Resources [S. l.]*, 2015. Relatório principal, FAO, 2015.
- Greinert, A., Drab, M., Kostecki, J., Fruzińska, R., 2013b. Post-mining soils in Łęknica region, [In:] Charzyński, P., Hulisz, P. Bednarek, R. (eds.), *Technogenic soils of Poland*. Toruń, Polish Society of Soil Science, 233–253.

Hafeez, F.; Spor, A.; Breuil, M-C.; Schwartz, C.; Martin-Laurent, F.; Philippot, L. Distribution of bacteria and nitrogen-cycling microbial communities along constructed Technosol depth-profiles. *J. Hazard Mater.*, 231–232 (2012), pp. 88-97.

Huot, H., Simonnot, M., Morel, J.L., 2015. Pedogenetic Trends in Soils Formed in Technogenic Parent Materials. *Soil Sci.* 180, 182–192.

IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. Dados econômicos trimestrais. Brasília: IBRAM, 2022.

IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2006. A framework for international classification, correlation and communication. 2006.

Kabala, C., Greinert, A., Charzyński, P., Uzarowicz, L., 2020. Technogenic soils – soils of the year 2020 in Poland. Concept, properties and classification of technogenic soils in Poland. *Soil Science Annual*, 267-280.

Manhattan Lebrun, Carmelo Macri, Florie Miard, Nour Hattab-Hambli, Mikael Motelica-Heino, Domenico Morabito, Sylvain Bourgerie. Effect of biochar amendments on As and Pb mobility and phytoavailability in contaminated mine technosols phytoremediated by *Salix*. *Journal of Geochemical Exploration*, Volume 182, Part B, 2017, Pages 149-156.

Nachtergaele, F. The “soils” to be classified in the World Reference Base for Soil Resources. *Eurasian Soil Science*, v. 38, n. SUPPL. 1, p. S13–S19, 2005.

Nour Hattab, Mikael Motelica-Heino, Olivier Faure, Jean-Luc Bouchardon. Effect of fresh and mature organic amendments on the phytoremediation of technosols contaminated with high concentrations of trace elements. *Journal of Environmental Management*, Volume 159, 2015, Pages 37-47.

Párraga-Aguado, I.; Álvarez-Rogel, J.; González-Alcaraz, M.N.; Conesa, H.M. Metal mobility assessment for the application of an urban organic waste amendment in two degraded semiarid soils. *J. Geochem. Explor.*, 173 (2017), pp. 92-98.

Riley, S.J.; Gardiner, B. Characteristics of slope wash erosion on the waste rock dump, ranger uranium mine, Northern territory. *Conference Paper Issue 91 pt 22, v.1, p. 295-300, 1991.*

Rodríguez-Vila, A. et al., 2016. Build-up of carbon fractions in Technosol-biochar amended partially reclaimed mine soil grown with *Brassica juncea*. *J. Soils Sediments* 16

Rodríguez-Vila, A.; Asensio, V.; Forján, R.; Covelo E.F. Assessing the influence of technosol and biochar amendments combined with *Brassica juncea* L. on the fractionation of Cu, Ni, Pb and Zn in a polluted mine soil. *J. Soils Sediments*, 16 (2016), pp. 339-348.

Rodríguez, L.; Gómez, R.; Sánchez, V.; Villaseñor, J.; Alonso-Azcárate, J. Performance of waste-based amendments to reduce metal release from mine tailings: one-year leaching behaviour. *J. Environ. Manag.*, 209 (2018), pp. 1-8.

Rossiter, D. G. Classification of urban and industrial soils in the World Reference Base for Soil Resources. *Journal of Soils and Sediments*, v. 7, n. 2, p. 96–100, 2007.

Ruiz, F.; Sartor, L.R.; Júnior, V.S. S.; dos Santos, J.C.B.; Ferreira, T.O. Fast pedogenesis of tropical Technosols developed from dolomitic limestone mine spoils (se-brazil). *Geoderma*, [s. L.], 2020.

Sanderson EW, Jaiteh M, Levy MA, Redford KH, Wannebo AV, Woolmer G (2002) The human footprint and the last of the wild. *Bioscience* 52(10):891–904.

Séré, G.; Schwartz, C.; Ouvrard, S.; Renat, J-C.; Watteau, F.; Villemin, G et al. Early pedogenic evolution of constructed Technosols. *J. Soils Sediments*, 10 (2010), pp. 1246-1254.

# 1. TECNOSSOLOS CONSTRUÍDOS DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE FERRO E RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO CIVIL: POTENCIAL COMO SUBSTRATO PARA O DESENVOLVIMENTO DE PLANTAS

## Resumo

A mineração e a construção civil são atividades antrópicas que impactam a paisagem e o meio ambiente, resultando em um volume extenso de resíduos abandonados em pilhas de materiais sem aproveitamento econômico. Sendo assim, solos construídos a partir de resíduos sólidos, chamados Tecnosolos, podem servir como uma alternativa de "Nature Based Solutions (NBS) – Soluções Baseadas na Natureza" para mitigar os impactos negativos dessas atividades. Neste contexto, este estudo teve como objetivo avaliar o desenvolvimento de gramíneas tropicais em Tecnosolos construídos com rejeitos de minério de ferro (RMF) e resíduos de construção civil (RCC), em um experimento conduzido por quatro meses em campo. Foram elaborados quatro tipos de Tecnosolos com diferentes proporções: TEC<sub>60;40</sub> – 60% RMF e 40% RCC; TEC<sub>70;30</sub> – 70% RMF e 30% RCC; TEC<sub>80;20</sub> – 80% RMF e 20% RCC;

TEC<sub>100</sub> – 100% RMF em vasos de 100 litros onde foi cultivado *Urochloa brizantha* cv. Marandu. A fim de comparar o desenvolvimento das plantas, foi utilizado um Latossolo Vermelho-Amarelo como tratamento Controle. Ao final do experimento, as plantas presentes nos Tecnosolos apresentaram produção de biomassa aérea total 3,3 vezes maior do que aquelas presentes no tratamento Controle (251±77 g), apresentando uma média de 825±270 g de biomassa aérea. A maior produção de biomassa nos Tecnosolos pode estar associada às condições químicas favoráveis desses solos tais como os maiores valores significativos de pH (pH = 7 para os Tecnosolos e pH = 4,7 para o solo natural), capacidade de troca catiônica (CTC = 71 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> para os Tecnosolos e 40 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> para o Controle) e soma de bases (SB = 65 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> e 20 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>). Além disso os Tecnosolos apresentaram maiores concentrações de Ca, P, Mg e K, macronutrientes essenciais para o crescimento das plantas o que está positivamente correlacionado com a maior biomassa aérea das plantas presentes nestes solos. Portanto, os Tecnosolos foram capazes de atuar como um substrato favorável ao crescimento de gramíneas tropicais, podendo ser empregados como uma *Nature Based Solution* para recuperar áreas degradadas.

Palavras chaves: Solos construídos, Resíduos sólidos, Recuperação de áreas degradadas, Soluções Baseadas na Natureza, *Urochloa brizantha* cv. Marandu.

## Abstract

Mining and construction activities are anthropogenic activities that impact the landscape and the environment, resulting in a large volume of waste materials abandoned in unused piles. Therefore, constructed soils using solid waste, known as Technosols, can serve as a "Nature-Based Solutions (NBS)" alternative to mitigate the negative impacts of these activities. In this context, this study aimed to evaluate the development of tropical grasses in Technosols constructed with iron ore tailings (IOT) and construction and demolition waste (CDW) in a four-month field experiment. Four types of Technosols were created with different proportions: TEC<sub>60;40</sub> – 60% IOT and 40% CDW; TEC<sub>70;30</sub> – 70% IOT and 30% CDW; TEC<sub>80;20</sub> – 80% IOT and 20% CDW; TEC<sub>100</sub> – 100% IOT in 100-liter pots where *Urochloa brizantha* cv. Marandu was cultivated. To compare plant development, a Red-Yellow Latosol was used as the Control treatment. At the end of the experiment, the plants in the Technosols showed a total aboveground biomass production 3.3 times higher than those in the Control treatment (251±77 g), with an average of 825±270 g of

aboveground biomass. The higher biomass production in the Technosols may be associated with the favorable chemical conditions of these soils, such as higher significant pH values (pH = 7 for the Technosols and pH = 4.7 for the natural soil), cation exchange capacity (CTC = 71 mmolc dm<sup>-3</sup> for the Technosols and 40 mmolc dm<sup>-3</sup> for the Control), and sum of bases (SB = 65 mmolc dm<sup>-3</sup> and 20 mmolc dm<sup>-3</sup>). Additionally, the Technosols showed higher concentrations of Ca, P, Mg, and K, essential macronutrients for plant growth, which were positively correlated with the greater aboveground biomass of plants in these soils. Therefore, Technosols were able to act as a favorable substrate for the growth of tropical grasses and could be employed as a Nature-Based Solution for the restoration of degraded areas.

Keywords: Constructed soils, Solid waste, Restoration of degraded areas, Nature-Based Solutions, *Urochloa brizantha* cv. Marandu

## 1.1 Introdução

A mineração e a construção civil são atividades que se caracterizam por alterar significativamente as paisagens naturais (FERNANDES et al., 2016; PERLATTI et al., 2015; ROBLES-ARENAS et al., 2006). O Brasil é um dos principais geradores de resíduos sólidos da América Latina, totalizando aproximadamente 81,8 milhões de toneladas produzidas em 2022 (ABRELPE, 2022).

A prática mineradora requer a abertura de cavas para que a empresa exerça suas atividades a céu aberto, resultando na diminuição da biodiversidade e modificação do relevo, já que há quebra, alteração e transporte das rochas para a abertura dessas áreas. Assim, as operações removem o regolito e a vegetação por inteiro para a exploração do minério, gerando grandes impactos ambientais negativos (DIAS E BRÍGIDO et al., 2013). O Brasil se destaca como um dos maiores exploradores de minérios de ferro do mundo, extraindo cerca de 240 milhões de toneladas por ano (IBRAM, 2022) com destaque para a maior área localizada no Quadrilátero Ferrífero - MG que ocupa aproximadamente 7000 km<sup>2</sup> do território nacional (CAXITO & DIAS, 2018).

Além da mineração, o Brasil produz toneladas de resíduos de construção civil (RCC), estima-se que são coletadas mais de 48 milhões de toneladas de RCC por ano, resultando cerca de 227 kg de RCC/habitante por ano (ABRELPE, 2022). No entanto, o descarte inadequado desses resíduos representa um problema ambiental, pois não reduzem de volume ao longo do tempo, o que acelera o esgotamento do espaço disponível para descarte e limita seu uso posterior após o encerramento das atividades, exigindo assim, uma destinação apropriada em aterros de inertes (CONAMA, 2002).

Portanto, além da alteração paisagística e ambiental, essas atividades antrópicas geram um volume extenso de material de descarte que, muitas das vezes, são abandonados em pilhas de materiais que não são aproveitados, podendo acentuar danos ambientais graves na

área explorada (RILEY E GARDINER, 1991; ESPÓSITO 2000).

Neste contexto, solos construídos artificialmente a partir de resíduos, com objetivos específicos (i.e. recuperação de áreas degradadas), os chamados Tecnossolos, podem ser uma alternativa de "*Nature Based Solutions – Soluções baseadas na Natureza (NBS)*" para aumentar a resiliência dos ecossistemas naturais por meio de estratégias eficientes, visando diminuir impactos ambientais negativos gerados por essas atividades (UICN–SUL, 2019). Essas soluções surgem como uma alternativa para lidar com a degradação dos solos, perda de matéria orgânica do solo e para atingir a recuperação dos serviços ecossistêmicos, especialmente os de regulação climática (HAFEEZ et al., 2012; SÉRÉ et al., 2010; ASENSIO et al., 2014).

Os Tecnossolos são solos que foram reconhecidos pela Base de Referência Mundial para Recursos do Solo, em 2006, e que evidenciam uma pedogênese fortemente afetada por intervenções humanas (IUSS WORKING GROUP WRB, 2006; DE KIMPE & MOREL, 2000; PEDRON et al., 2004; IUSS WORKING GROUP WRB, 2014). Assim, por definição, os Tecnossolos são solos antrópicos, caracterizados por uma dominância ou forte influência por materiais tecnogênicos, chamados de artefatos, isto é, materiais modificados ou criados pelas ações humanas que não ocorreriam de forma natural no ecossistema, por exemplo, lixo doméstico, lodos de estação de tratamento de água e esgoto, rejeitos de mineração, resíduos de construção civil (HUOT et al., 2015; RODRÍGUEZ-VILA et al., 2016; ASENSIO et al., 2019; RUIZ et al., 2020).

Em vista disso, estudos prévios indicam um grande potencial do uso de diferentes rejeitos como potenciais substratos para a construção de solos artificiais que podem não apenas promover o crescimento de espécies vegetais mais ainda viabilizar a recuperação de áreas degradadas, além de ser um método economicamente viável para se reutilizar rejeitos atribuindo valores econômicos e ecológicos (PUNSHON et al., 2002; IJAH & NDANA, 2003; MACÍAS, 2004; CALACE et al., 2005; BENCHIMOL et al., 2006; BATTAGLIA et al., 2007; MACÍAS et al., 2007; BERTONCINI et al., 2008; CAMPS ARBESTAIN et al., 2008; YAO et al., 2009a e 2009b; ASENSIO et al., 2013; LOPES, 2020; RUIZ et al., 2020, GONÇALVES et al., 2022). Como exemplo, um estudo atual demonstrou que Tecnossolos construídos a partir de rejeitos de mineração de calcário dolomítico, apresentaram alta intensidade de processos pedogenéticos e rápida evolução, obtendo a recuperação de serviços ecossistêmicos esperados por solos saudáveis, revelando assim, seu potencial como sumidouro de carbono e seu possível uso para a restauração de paisagens pós-mineração (RUIZ et al., 2020).

O conceito de utilizar solos construídos de forma "inteligente" para atuarem como

um substrato capaz de desempenhar funções específicas ainda são escassos e requerem avanços para ampliação dessa técnica (ASENSIO et al., 2013b; ASENSIO et al., 2014; RODRÍGUEZ-VILA et al., 2016; PÁRRAGA-AGUADO et al., 2017; RODRÍGUEZ et al., 2018). O uso de rejeitos de mineração e resíduos de construção civil para a elaboração de Tecnosolos podese uma alternativa para a ampliação desses conhecimentos, dada a produção em larga escala no Brasil.

Desse modo, o presente estudo tem como objetivo geral utilizar Tecnosolos construídos de rejeito de minério de ferro e resíduo de construção civil, como uma potencial NBS para recuperação de áreas degradadas por meio da avaliação do estabelecimento de gramíneas tropicais. Portanto, hipotetiza-se que i) Tecnosolos elaborados com rejeito de mineração de ferro e resíduo de construção civil serão capazes de atuar como substrato para o crescimento de gramíneas; ii) Diferentes proporções de rejeito e resíduo afetarão o desenvolvimento das plantas, isto é, produção de biomassa e acúmulo de nutrientes. Dessa forma, pretende-se fornecer bases para o emprego de Tecnosolos construídos com rejeito de mineração de ferro e resíduo de construção civil como uma NBS na recuperação de áreas degradadas.

### **1.5. Conclusões**

Diante da problemática ambiental relacionada à destinação inadequada, e, aos consideráveis volumes gerados pelas atividades de mineração e de construção civil, é necessário buscar soluções sustentáveis e baseadas na própria natureza para recuperar áreas que foram degradadas por estas práticas a curto e longo prazo.

O presente estudo demonstrou o potencial de uso de Tecnosolos elaborados a partir da mistura de Rejeito de Mineração de Ferro e Resíduos de Construção Civil para promover o crescimento de gramíneas tropicais em áreas degradadas. Os resultados indicam que o uso desses Tecnosolos pode ser uma alternativa viável, uma vez que as plantas apresentaram um crescimento adequado, 3,3 vezes superior ao do solo natural, produzindo quantidades significativas de biomassa aérea. Estudos prévios relatam que a produtividade da brachiária

Embora não tenha ocorrido um acúmulo expressivo de nutrientes nas plantas, os Tecnosolos estimularam um maior crescimento da parte aérea das gramíneas devido às condições químicas favoráveis do solo, tais como os maiores valores significativos maiores de pH (pH = 7 para os Tecnosolos e 4,7 para o Controle), capacidade de troca catiônica (CTC = 71 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> para os Tecnosolos e 40 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> para o solo natural) e soma

de bases ( $SB = 65 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  para os Tecnosolos e  $20 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  para o Controle). Além disso, a análise de componentes principais mostrou que os Tecnosolos possuem maior concentração de Ca, P, Mg e K, macronutrientes essenciais para o crescimento das plantas o que está positivamente correlacionado com a maior biomassa aérea das plantas presentes nestes solos. Ademais, os Tecnosolos apresentaram maior CTC devido à predominância de óxidos de ferro responsáveis pela adsorção de cátions básicos que ocuparam a CTC destes solos, enquanto o solo natural (Controle) apresentou menor CTC e maior acidez potencial, resultando em maior disponibilidade de ferro (Fe), alumínio (Al) e zinco (Zn) na solução do solo.

Portanto, os Tecnosolos foram capazes de atuar como substrato para o crescimento de gramíneas, podendo ser empregados como uma *Nature Based Solution* para recuperar áreas degradadas. No entanto, é necessário realizar estudos a longo prazo para validar esses resultados e avaliar a proporção ideal da mistura dos resíduos utilizados. Nesse sentido, estudos futuros devem buscar avaliar a viabilidade técnica e econômica do uso de Tecnosolos na recuperação de áreas degradadas por atividades antrópicas.

## Referências

Ahirwal, J. et al., 2018. Reclamation of coal mine spoil and its effect on Technosol quality and carbon sequestration: a case study from India. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25, 27992–28003.

Ahirwal, J., Maiti, S.K., 2018. Development of Technosol properties and recovery of carbono stock after 16 years of revegetation on coal mine degraded lands, India. *Catena* 166, 114–123

Asensio, V.; Veja, F.A.; Covelo, E.F. Effect of soil reclamation process on soil C fractions *Chemosphere*, 95 (2014), pp. 511-518

Asensio, V.; Veja, F.A.; Andrade, M.L.; Covelo, E.F. Tree vegetation and waste amendments to improve the physical condition of copper mine soils. *Chemosphere*, 90 (2013), pp. 603-610,

Asensio, V., Guala, S.D., Vega, F.A., Covelo, E.F., 2013. A soil quality index for reclaimed mine soils. *Environ. Toxicol. Chem.* 32, 2240–2248.

Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais -



ABRELPE. Panorama Nacional dos Resíduos Sólidos 2022. São Paulo, 2022.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7175: cal hidratada para argamassas. Rio de Janeiro: ABNT, 2003

Batista, M.A., Inoue, T.T., Esper Neto, M., e Muniz, A.S. Princípios de fertilidade do solo, adubação e nutrição mineral. In: Brandão filho, J.U.T., Freitas, P.S.L., Berian, L.O.S., e Goto, R., comps. Hortaliças-fruto [online]. Maringá: EDUEM, 2018, pp. 113-162.

Battaglia, A., Calace, N., Nardi, E., Petronio, B.M., Pietroletti, M., 2007. Reduction of Pb and Zn bioavailable forms in metal polluted soils due to paper mill sludge addition. Effects on Pb and Zn transferability to barley. *Bioresour. Technol.* 98, 2993–9

Benchimol, R.L., Sutton, J.C., Dias-Filho, M.B., 2006. Potential of crab shell for reducing incidence of fusariosis and promoting growth of black pepper transplants. *Fitopatol Bras.* 31, 180–184.

Bertoncini, E.I., D’Orazio, V., Senesi, N., Mattiazzo, M.E., 2008. Effects of sewage sludge amendment on the properties of two Brazilian oxisols and their humic acids. *Bioresour. Technol.* 99, 4972–9.

Calace, N., Campisi, T., Iacondini, A., Leoni, M., Petronio, B.M., Pietroletti, M., 2005. Metal-contaminated soil remediation by means of paper mill sludges addition: chemical and ecotoxicological evaluation. *Environ. Pollut.* 136, 485–92.

Camargo, L. A.; Marques júnior, J.; Pereira, G. T.; Alleoni, L. R. F. Spatial correlation between the composition of the clay fraction and contents of available phosphorus of an Oxisol at hillslope scale. *Catena, Cremlingen*, 100, p.100-106, 2012.

Camps-Arbestain, M., Madinabeitia, Z., Anza Hortalà, M., Macías-García, F., Virgel, S., Macías, F., 2008. Extractability and leachability of heavy metals in Technosols prepared from mixtures of unconsolidated wastes. *Waste Management* 28, p.2653-2666.

Cantarutti, R.B.; Alvarez, V.V.H.; Ribeiro, A.C. Pastagens. In: *Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª aproximação*, p.332-341. (Eds. A.C. Ribeiro; P.T.G. Guimarães; V.V.H. Alvarez). Viçosa: FSEMG/UFV, 1999.

Canut, Mariana Moreira Cavalcanti. Estudo da viabilidade do uso do resíduo fosfogesso como material de construção. 2006. Dissertação apresentada ao Programa de Pósgraduação

em Construção Civil (Mestre em Construção Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, 2006.

Capra, G. F; Ganga, A.; Grilli, E.; Vacca, S.; Buondonno, A. A review on anthropogenic soils from a worldwide perspective. *J Soils Sediments* 15, 1602–1618 (2015).

Caxito, F. & Dias, T.G. Recursos Minerais de Minas Gerais – Ferro. Centro de Pesquisas Manoel Teixeira da Costa – Instituto de Geociências. Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.

Chang, W.F.; Mantell, M.I. Engineering properties and construction applications of phosphogypsum. Florida Institute of Phosphate Research. Coral Gables: Florida, 1990. 201 p. ISBN 87024-28-4

Chen, P.-Y., 1977. Table of Key Lines in X-Ray Powder Diffraction Patterns of Minerals in Clays and Associated Rocks. Department of Natural Resources, Indiana Geological Survey, Bloomington, Indiana.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA. Resolução n° 307 de 5 de julho de 2002.

Costa, K.D.P.; Oliveira, I.P.; Faquin, V. Adubação nitrogenada para pastagens do gênero *Brachiaria* em solos do Cerrado. Documentos 192. Embrapa Arroz e Feijão, 2006. 60p.

Costa, A. C. S. da; Bigham, J. M. Óxidos de Ferro. In: MELO, Vander de Freitas; ALLEONI, Luís Reynaldo Ferracciú (Ed.). Química e Mineralogia do Solo: Parte I - Conceitos Básicos. Viçosa: Sbc, 2009. Cap. 8. p. 506-257.

De Kimpe, C.R.; Morel, J.L. Urban soil management: a growing concern. *Soil Science*, v.165,n.1, p.31-40, 2000.

De Souza, M. A. Fenologia e Morfologia Reprodutivas de Ecótipos de *Brachiária* spp. 1995.

97 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração: Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ (USP), Piracicaba, 1995.

Dias, N. Da S.; Brigido, A. R.; Souza, A. C. M. (org.). Manejo e conservação dos solos e da água. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2013. 288 p.

Dicen, G.P., Navarrete, I.A., Rallos, R. V., Salmo, S.G., Garcia, M.C.A., 2019. The role of reactive iron in long-term carbon sequestration in mangrove sediments. *J. Soils Sediments* 19,501–510.

Dixon, J. B.; Weed, B.; Minerals in Soil Environments, 2nd ed., Madison University Press: Madison, 1989, p. 279

Dos Anjos, M.J., Lopes, R.T., de Jesus, E.F.O., Assis, J.T., Cesareo, R., Barradas, C. A. A. Quantitative analysis of metals in soil using X-ray fluorescence. *Spectrochim. Acta, Part B*, 55 (2000), pp. 1189-1194.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Gado de Corte, Campo Grande, MS. **Brachiaria brizantha** cv. Marandu. Campo Grande, EMBRAPA -CNPGC, 1984. 31p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Embrapa gado de corte.

Soluções Tecnológicas: *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. In: *Negócios e vitrines de Tecnologias*, 2015.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solos. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 230 p., 2017.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, Sistema brasileiro de classificação de solos: 5. ed.: 1-353. EMBRAPA, Brasília. 2018.

Espósito, T.J. (2000). Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeitos construídas por aterro hidráulico. Tese de doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 359 p.

Essington, M. E. *Soil and water chemistry: An integrative approach*. CRC press, 2003.

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Status of the World's Soil Resources* [S. l.], 2015. Relatório principal, FAO, 2015

Fernandes, G.W. et al., 2016. Deep into the mud: ecological and socioeconomic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. *Nat. Conserv.* 14, 35–45.

Fischer, Georg. Iron ore, economic geology and networks of experts between Wisconsin and the state of Minas Gerais, 1881-1914. *História, Ciências, Saúde-Manguinhos*, v. 21. mar. 2014.

Fontes, M.P.F.; Camargo, O.A.; Sposito, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. *Scientia Agrícola*, Piracicaba, v.58, p. 627-646, 2001.

Gee G, OR D. Particle-size analysis. In: Dane JH, Topp C, editors. *Methods of soil analysis: Physical methods*. Madison: Soil Science Society of America; 2002. p.255-93.

Gonçalves, J.O.; Fruto, C.M.; Barranco, M.J.; Oliveira, M.L.S.; Ramos, C.G. Recovery of Degraded Areas through Technosols and Mineral Nanoparticles: A Review. *Sustainability* 2022, 14, 993. <https://doi.org/10.3390/su14020993>

Hafeez, F.; Spor, A.; Breuil, M-C.; Schwartz, C.; Martin-Laurent, F.; Philippot,

L. Distribution of bacteria and nitrogen-cycling microbial communities along constructed Technosol depth- profiles. *J. Hazard Mater.*, 231–232 (2012), pp. 88-97, 10.1016/j.jhazmat.2012.06.041

Henneberry, Y.K., Kraus, T.E.C., Nico, P.S., Horwath, W.R., 2012. Structural stability of coprecipitated natural organic matter and ferric iron under reducing conditions. *Org. Geochem.* 48, 81–89.

Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Telszewski, M., Pidgeon, E., Telszewski, M., 2014. Coastal blue carbon: methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses, Conservation International. Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature, 564 Arlington, VA, USA, Arlington, VA, USA.

Huot, H., Simonnot, M., Morel, J.L., 2015. Pedogenetic Trends in Soils Formed in Technogenic Parent Materials. *Soil Sci.* 180, 182–192

IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. Gestão de manejo de rejeitos de mineração. 1.ed. –Brasília: IBRAM, 2016.

IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. Dados econômicos trimestrais. Brasília: IBRAM, 2022.

Ijah, U.J.J., Ndana, M., 2003. Stimulated biodegradation of crude oil in soil amended with periwinkle shells. *Environmentalist* 23, 249–254.

International Plant Nutrition Institute (IPNI). International Soil Fertility Manual. Tradução e adaptação de Alfredo Scheid Lopes. 2 ed., rev. e ampl. Piracicaba: POTAFOS, 1998. 177p.

IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2006. A framework for international classification, correlation and communication. 2006.

Lasso, P. R. O.; Vaz, C. M. P.; Bernardi, A. C. C.; Oliveira, C. R.; Bacchi, O. O. S. Avaliação do uso de resíduos de construção e demolição reciclados como corretivo da acidez do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2013, 37(6), 1659-1668.

Lopes, T. A. Tecnosolos elaborados com resíduos da construção civil: potencial para a recuperação de áreas degradadas. 2020. 76 p. Dissertação (Mestrado em Ciências, área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (USP), Piracicaba, 2020.

Maes, Joachim; Jacobs, Sander. Nature-Based Solutions for Europe’s Sustainable Development. *Conservation Letters - A journal of the society for Conservation Biology*, [S.l.], v. 10, n. 1, p. 121-124, 27 nov. 2017.

Malavolta, E.; Boareto, A. E.; Paulino, V. T. Micronutrientes: uma visão geral. In:Ferreira,

M.E.; Cruz, M. C. P. da (Org.). *Micronutrientes na agricultura*. Piracicaba: Potafos, 1991. p. 1- 33.

Meier, L.P., Menegatti, A.P., 1997. A new, efficient, one-step method for the removal of organic matter from claycontaining sediments. *Clay Miner.* 32, 557–563.

Mehra, O.P. & Jackson, M.L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In: *CLAYS & CLAY MINERAL CONFERENCE*, 7., London, 1960. *Proceedings*. London, v.7, 1960. p.317-327.

Párraga-Aguado, I.; Álvarez-Rogel, J.; González-Alcaraz, M.N.; Conesa, H.M. Metal mobility assessment for the application of an urban organic waste amendment in two degraded semiarid soils. *J. Geochem. Explor.*, 173 (2017), pp. 92-98.

Pereira, L.E.T. et al. *Recomendações para correção e adubação de pastagens tropicais*. Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Pirassununga, p. 1-59, 2018.

Pedron, F. de A.; Dalmolin, R.S.D.; de Azevedo, A.C.; Kaminski, J. *Solos Urbanos: Urban Soils*. *Ciência Rural*, [s. l.], 2004.

Perlatti, F.; Ferreira, T.O.; da Costa Roberto, F.A.; Romero, R.E.; Sartor, L.R.; Otero, X.L. Trace metal/metalloid concentrations in waste rock, soils and spontaneous plants in the surroundings of an abandoned mine in semi-arid NE-Brazil. *Environ. Earth Sci.*, 74 (2015),pp. 5427-5441.

Perlatti, F. et al., 2015. Geochemical speciation and dynamic of cooper in tropical semiarid soils exposed to metal-bearing mine wastes. *Sci. Total Environ.* 500–501, 91–102.

QUAGGIO, J.A. *Acidez e calagem em solos tropicais*. Campinas, Instituto Agrônômico, 2000. 111p.

Riley, S.J.; Gardiner, B. Characteristics of slope wash erosion on the waste rock dump, rangeruranium mine, Northern territory. *Conference Paper Issue 91 pt 22*, v.1, p. 295-300, 1991.

Robles-Arenas, V.M. et al., 2006. Sulphide-mining impacts in the physical environment: Sierra de Cartagena–la Unión (se Spain) case study. *Environ. Geol.* 51, 47–64.

Rodríguez-Vila, A. et al., 2016. Build-up of carbon fractions in Technosol-biochar amendedpartially reclaimed mine soil grown with Brassica juncea. *J. Soils Sediments* 16.

Rodríguez-Vila, A.; Asensio, V.; Forján, R.; Covelo E.F. Assessing the influence of technosol and biochar amendments combined with Brassica juncea L. on the fractionation of Cu, Ni, Pb and Zn in a polluted mine soil. *J. Soils Sediments*, 16 (2016), pp. 339-348.

Rodríguez, L.; Gómez, R.; Sánchez, V.; Villaseñor, J.; Alonso-Azcárate, J. Performance of waste-based amendments to reduce metal release from mine tailings: one-year leaching

behaviour. *J. Environ. Manag.*, 209 (2018), pp. 1-8.

Ronquim, C. C. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais

– 2<sup>a</sup> ed. Campinas: Embrapa - Monitoramento por Satélite, 2020. 34 p.: il. (*Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*, 35).

Ruiz, F.; Sartor, L.R.; Júnior, V.S. S.; dos Santos, J.C.B.; Ferreira, T.O. Fast pedogenesis of tropical Technosols developed from dolomitic limestone mine spoils (se-brazil). *Geoderma*, [s. L.], 2020.

Sanderson EW, Jaiteh M, Levy MA, Redford KH, Wannebo AV, Woolmer G (2002) The human footprint and the last of the wild. *Bioscience* 52(10):891–904.

Secretaria de Energia e Mineração. Cadeia Produtiva de Minerais Utilizados no Agronegócio no Estado de São Paulo. 2018.

Séré, G.; Schwartz, C.; Ouvrard, S.; Renat, J-C.; Watteau, F.; Villemin, G et al. Early pedogenic evolution of constructed Technosols. *J. Soils Sediments*, 10 (2010), pp. 1246-1254

Taiz, L.; Zeiger, E.; Møller, I.M.; Murphy, A. *Plant physiology and development*. 2015 No.Ed. 6.761 pp.

U.S. EPA. 1996. “Method 3050B: Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils,” Revision 2. Washington, DC.

UICN - União Internacional para a Conservação da Natureza. Relatório anual 2019. Escritório Regional América do Sul - Equador, 2020.

Werner, J.C., Paulino, V.T., Cantarella, H., Andrade, N.O. and Quaggio, J.A. (1997). Forrageiras. In: *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo – Boletim Técnico 100*, p. 261-273 (Eds. B. Van Raij, H. Cantarella, J. A. Quaggio and A. M. C. Furlani). Campinas: IAC.

Yao, F. X.; Macías, F.; Virgel, S.; Blanco, F.; Jiang, X.; Camps Arbestain, M. Chemical changes in heavy metals in the leachates from Technosols. *Chemosphere*, v. 77, n. 1, p. 29– 35, 2009a.

Yao, F. X.; Macías, F.; Virgel, S.; Blanco, F.; Jiang, X.; Camps Arbestain, M. Influence of the acid buffering capacity of different types of Technosols on the chemistry of their leachates. *Chemosphere*, v. 74, n. 2, p. 250–258, 2009b.

Zhao, Q., Dunham-Cheatham, S., Adhikari, D., Chen, C., Patel, A., Poulson, S.R., Obrist, D., Verburg, P.S.J., Wang, X., Roden, E.R., Thompson, A., Yang, Y., 2020. Oxidation of soil organic carbon during an anoxic-oxic transition. *Geoderma* 377, 114584.

## 2. MECANISMOS DE ESTABILIZAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA EM TECNOSSOLOS CONSTRUÍDOS A PARTIR DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE FERRO E RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

### Resumo

As atividades antrópicas, com destaque a mineração e construção civil, têm levado o solo a perdas significativas de matéria orgânica, devido a mudanças no uso da terra e práticas inadequadas de manejo, resultando em redução do carbono armazenado no solo e aumento das emissões de gases de efeito estufa. A quantidade de matéria orgânica do solo (MOS) está diretamente relacionada à sua capacidade em sequestrar carbono, no entanto, a MOS está sujeita à decomposição, o que torna necessário adotar medidas que promovam sua preservação a longo prazo no solo. Por isso, é essencial compreender os mecanismos de estabilização, i.e. interações organo-minerais, que podem proteger a mesma da decomposição microbiana. Neste contexto, os Tecnosolos surgem como uma alternativa promissora para serem construídos com o objetivo de combater a perda de matéria orgânica do solo, principalmente por meio da estabilização da MOS. Por este motivo, o presente estudo teve como objetivo desenvolver Tecnosolos construídos, principalmente de rejeito de minério de ferro (RMF) e resíduo de construção civil (RCC), visando a avaliação do potencial destes solos em estabilizar matéria orgânica por meio de interações organo-minerais entre, principalmente, ferro e carbono. Foram elaborados quatro tipos de Tecnosolos com diferentes proporções: TEC<sub>60;40</sub> – 60% RMF e 40% RCC; TEC<sub>70;30</sub> – 70% RMF e 30% RCC; TEC<sub>80;20</sub> – 80% RMF e 20 % RCC; TEC<sub>100</sub> – 100% RMF em vasos de 100 litros onde foi cultivado *Urochloa brizantha* cv. Marandu. Foi utilizado um Latossolo Vermelho-Amarelo como tratamento Controle. Após o fim do experimento, os Tecnosolos apresentaram incrementos de carbono orgânico no solo (COS) significativamente maiores quando comparados ao tratamento Controle, um média de 185±% a mais em relação ao valor inicial, enquanto o Controle apresentou 23±%. Esse incremento ocorreu, principalmente, na fração da matéria orgânica particulada (POM). Isso pode estar associado à intensa ciclagem e atividade das raízes das gramíneas utilizadas no experimento. As extrações químicas na fração da matéria orgânica associada aos minerais (MOAM), demonstrou que a presença de óxidos de Fe de alta cristalinidade e íons de cálcio nos Tecnosolos formaram complexos ternários com o COS, apresentando um papel crucial no entendimento da estabilidade da MOS para estes solos.

Palavras-chave: Carbono orgânico do solo, Interações organominerais, Solos urbanos, Regulação climática.

### Abstract

Anthropogenic activities, notably mining and construction, have led to significant losses of organic matter in the soil due to land use changes and improper management practices. This has resulted in a reduction of carbon stored in the soil and increased greenhouse gas emissions. The amount of soil organic matter (SOM) is directly related to its carbon sequestration capacity; however, SOM is susceptible to decomposition, necessitating measures to promote its long-term preservation in the soil. Therefore, it is essential to understand the mechanisms of stabilization, such as organo-mineral interactions, which can protect it from microbial decomposition. In this context, Technosols emerge as a promising alternative to be constructed with the aim of combating soil organic matter loss, primarily through the stabilization of SOM. For this reason, the present study aimed to develop constructed Technosols, mainly using iron ore tailings (IOT) and construction waste (CW), to evaluate the potential of these soils to stabilize organic matter through organo-mineral

interactions, primarily involving iron and carbon. Four types of Technosols were created with different proportions: TEC60;40 - 60% IOT and 40% CW; TEC70;30 - 70% IOT and 30% CW; TEC80;20 - 80% IOT and 20% CW; TEC100 - 100% IOT in 100-liter pots, where *Urochloa brizantha* cv. Marandu was cultivated. A Red-Yellow Latosol was used as the Control treatment. After the end of the experiment, the Technosols showed significantly higher increases in soil organic carbon (SOC) compared to the Control treatment, with an average of 185% more relative to the initial value, while the Control treatment showed 23%. This increase occurred mainly in the particulate organic matter (POM) fraction, which may be associated with the intense cycling and root activity of the grasses used in the experiment. Chemical extractions in the mineral-associated organic matter (MAOM) fraction demonstrated that the presence of high-crystallinity Fe oxides and calcium ions in the Technosols formed ternary complexes with SOC, playing a crucial role in understanding the stability of SOM in these soils.

Keywords: Soil organic carbon, Organo-mineral interactions, Urban soils, Climate regulation

## 2.1 Introdução

A matéria orgânica do solo (MOS) é um componente vital associado à serviços ecossistêmicos como regulação climática, prevenção da erosão, desenvolvimento radicular, complexação de metais tóxicos e aumento do grau de agregação do solo (BRONICK & LAL, 2005; SOARES et al., 2008). A quantidade de matéria orgânica armazenada nos solos pode ser um indicativo de sua capacidade de sequestro de carbono, uma vez que aproximadamente 58% dessa matéria é composta por carbono (MIELNICZUK, 2008), conferindo ao solo um potencial de armazenar três vezes mais carbono do que aquele encontrado na atmosfera ou nas plantas vivas (SCHMIDT et al., 2011).

No entanto, a MOS é passível de decomposição, tornando-se necessário medidas que contribuam para sua permanência no solo a longo prazo (LEHMANN & KLEBER, 2015). Nesse contexto, a interação de compostos orgânicos do solo com frações minerais (i.e., interações organo-minerais) no solo é conhecido como um dos principais mecanismos de estabilização, como por exemplo associações com óxidos e hidróxidos de metais cristalinos, argilas e carbonatos (BRONICK & LAL, 2005; CORRÊA et al., 2009). Assim, a compreensão de mecanismos de estabilização responsáveis pela proteção à decomposição são fundamentais para o avanço de medidas para manutenção da matéria orgânica no solo (MINASNY et al. 2017; HANKE & DICK, 2020).

As interações organo-minerais que ocorrem entre óxidos de Fe/Al, argila e matéria orgânica, por exemplo, são cruciais para a proteção da MOS contra a decomposição, bem como para a estabilização de compostos orgânicos em ambientes terrestres (DICK e



SCHWERTMANN, 1996; WISEMAN & PÜTTMANN, 2006; KLEBER et al., 2011; KLEBER et al., 2015). Principalmente porque os óxidos de Fe e Al são responsáveis pela sorção do carbono orgânico no solo, por meio da complexação e adsorção de grupos eletronegativos da MOS com as cargas positivas dos óxidos que podem ocorrer através de troca de ligantes, pontes catiônicas, ligação de H e forças de van der Waal (ARNASON & KEIL, 2000), tornando o carbono menos disponível para atividade microbiana (MUNNER & OADES, 1989; WISEMAN & PÜTTMANN, 2006; SAIDY et al., 2012; SONG et al., 2022). Isso ocorre também devido à grande área superficial específica e à abundância de grupos hidroxila presentes em óxidos de Fe (CHURCHMAN et al. 2020).

Além disso, é possível observar que a presença de carbonatos de cálcio também pode ter uma influência significativa nas interações organo-minerais, uma vez que a formação de complexos organo-calcários, por meio de pontes catiônicas entre argilas e  $\text{Ca}^{2+}$ , protege a matéria orgânica de processos de decomposição e aumentam sua estabilidade ao longo do tempo (ROWLEY et al., 2018; ROWLEY et al., 2021).

Em paralelo, sabe-se que a rizosfera possui um papel importante no entendimento da estabilização de complexos organo-minerais, já que é definida como a região dinâmica do solo, diretamente influenciada pelas raízes das plantas, onde interações físicas e químicas ocorrem entre as raízes, o solo e microrganismos presentes (LINCH, 1990; DARRAH et al., 2006). Considerando que os exsudados das raízes fornecem energia para a atividade microbiana, é provável que qualquer mudança no padrão de exsudação tenha um impacto significativo no ciclo e na persistência do carbono orgânico do solo na rizosfera (ZHENG et al., 2022). Por isso, estudar as diferenças entre as interações organo-minerais no “bulk soil” e no “solo rizosférico” é relevante.

Apesar da relevância crucial da estabilidade da matéria orgânica para o funcionamento dos ecossistemas, a atividade humana tem causado perda significativa desse componente nos solos, principalmente devido às mudanças no uso da terra e às práticas inadequadas de manejo solo (SANDERSON et al., 2002; CAPRA et al., 2015, FAO, 2015). Essa perda tem levado a uma redução substancial na quantidade de carbono armazenada no solo e ao aumento das emissões de gases causadores do efeito estufa na atmosfera (ROSA et al., 2014).

Nesse contexto, os Tecnossolos surgem como uma alternativa promissora para combater a perda de matéria orgânica do solo e restaurar os serviços ecossistêmicos. Esses solos artificiais podem ser criados a partir da combinação de resíduos sólidos (i.e., resíduos urbanos, rejeitos industriais e de mineração) com objetivos específicos definidos (i.e, recuperação de áreas degradadas, RUIZ et al., 2020), e, mais recentemente, têm se mostrado como alternativa viável e eficiente para recuperar o conteúdo de carbono do solo (SÉRÉ et al., 2010; HAFEEZ et al.,

2012; ASENSIO et al., 2014; RUIZ et al., 2020). Estudos anteriores descrevem a elaboração desse tipo de solo por meio de misturas, feitas sob medida, de resíduos orgânicos e inorgânicos, com o intuito de melhorar características como pH, disponibilidade de nutrientes, toxicidade e acúmulo de matéria orgânica. Esses solos são utilizados para a restauração de áreas degradadas e/ou como uma opção economicamente viável para reutilizar resíduos, desempenhando funções ecossistêmicas de maneira semelhante aos solos naturais (MACÍAS et al., 2004; YAO et al., 2009a; ASENSIO et al., 2013; RUIZ et al., 2020; GONÇALVES et al., 2022).

Com base no conhecimento dos mecanismos de estabilização da matéria orgânica através de interações organo-minerais, este trabalho busca avaliar a possibilidade de se conceber/construir solos artificiais (ou seja, Tecnossolos) voltados especificamente para promover interações organominerais e, portanto, o sequestro estável de MOS a longo prazo. Assim, serão desenvolvidos Tecnossolos construídos a partir de rejeito de minério de ferro e resíduo de construção civil, visando solos eficientes em estabilizar a matéria orgânica através do estabelecimento de interações organo-minerais. Como hipótese tem-se que os Tecnossolos construídos possuem um grande potencial para estabilizar carbono por meio de interações organo-minerais entre óxidos de ferro e carbono.

## **2.5 Conclusões**

Os Tecnossolos construídos a partir da mistura de resíduos de minério de ferro (RMF) e construção civil (RCC) neste presente estudo evidenciaram grande potencial para estabilização da matéria orgânica e para aprimorar serviços de regulação climática.

O aumento do carbono orgânico do solo foi significativamente maior nos Tecnossolos, principalmente associado à matéria orgânica particulada (POM), quando comparado ao tratamento Controle (solo natural), graças à ciclagem e atividade intensa das raízes das gramíneas provocam maior entrada de biomassa no sistema. Apesar dos Tecnossolos apresentarem menores quantidades de carbono associado a MOAM, o alto teor de óxidos de ferro de alta cristalinidade presentes nos Tecnossolos juntamente com a alta quantidade de Ca e Mg (provido do RCC), podem ter desempenhado um papel importante na estabilização do carbono nesta fração. A formação de complexos ternários entre a matéria orgânica, os óxidos de ferro e o cálcio, podem ter influenciado a adsorção de carbono nos Tecnossolos.

Para o tratamento Controle, observa-se maiores quantidades de carbono associado a MAOM (quando comparado aos Tecnossolos), isso pode estar associado ao fato do Latossolo utilizado como controle possuir maiores quantidades de argila, e, porcentagem de óxidos de Fe de menor cristalinidade (i.e., lepidocrocita) que são mais reativos para a adsorção do COS.

Além disso, os resultados da extração sequencial com pirofosfato de sódio referentes ao Controle, mostraram correlação positiva entre o carbono complexado por cátions metálicos e Ca, podendo relacionar a presença deste cátion também com a estabilização da matéria orgânica neste tratamento.

Para a melhor compreensão dos mecanismos de estabilização que ocorreram nos Tecnosolos é necessário a realização de estudos com ciclos de maior duração da cultura, investigando principalmente o papel do Ca e do Mg, além da influência dos óxidos de Fe, na estabilização da MOS. Também são necessários estudos mais profundos sobre a composição dos grupos orgânicos presentes na MOS incrementada no sistema para uma melhor avaliação desses atributos.

## Referências

Allory, V., Séré, G., & Ouvrard, S. (2021). A meta-analysis of carbon content and stocks in Technosols and identification of the main governing factors. *European Journal of Soil Science*, 1–17

Antelo J, Arce F, Fiol S (2015) Arsenate and phosphate adsorption on ferrihydrite nanoparticles. Synergetic interaction with calcium ions. *Chem Geol* 410:53–62

Arnarson, T.S., Keil, R.G. Mechanisms of pore water organic matter adsorption to montmorillonite. *Mar. Chem.*, 71 (2000), pp. 309-320

Asensio, V.; Vega, F.A.; Andrade, M.L.; Covelo, E.F. Technosols Made of Wastes to Improve Physico-Chemical Characteristics of a Copper Mine Soil. *Pedosphere*, Volume 23, Issue 1, 2013, Pages 1-9.

Asensio, V.; Vega, F.A.; Covelo, E.F. Effect of soil reclamation process on soil C fractions *Chemosphere*, 95 (2014), pp. 511-518

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7175: cal hidratada para argamassas. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

Barcellos, D., Cyle, KT & Thompson. Faster redox fluctuations can lead to higher iron reduction rates in humid forest soils. *Biogeochemistry* 137, 367–378 (2018).

Bezerra, I. M. T. Cinza da casca do arroz utilizada em argamassas de assentamento e revestimento. Mestrado (Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, fls. 108, 2010.

Bienfait H E Bino R. J., van der Blik A. M., Duivenvoorden J F and Fontaine J M 1983 Characterization of ferric reducing activity in roots of Fe-deficient *Phaseolus vulgaris*. *Physiol. Plant.* 59, 196-202.

Bronick, C.J., Lal, R., 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124, 3–22.

Bruckert S, Gaiffe M, Duquet B, Tavant Y, Tavant H (1986) Rôle du flux de calcium sur la stabilisation de la matière organique des sols. *Ann Sci Univ France Comté Besançon* 4(6):25–29

Capel, E.L., de la Rosa Arranz, J.M., González-Vila, F.J., González-Perez, J.A., Manning, D.A.C., 2006. Elucidation of different forms of organic carbon in marine sediments from the Atlantic coast of Spain using thermal analysis coupled to isotope ratio and quadrupole mass spectrometry. *Org. Geochem.* 37, 1983– 1994.

Carvalho, F. A. N.; Barbosa, F. A.; McDowell, L. R. *Nutrição de Bovinos a pasto*. Belo Horizonte: PapelForm, p. 439, 2003.

Chan, K.Y. Heenan, D.P. So, H.B. Sequestration of carbon and changes in soil quality under conservation tillage on light-textured soils in Australia: a review. *Aust. J. Exp. Agric*, 43 (2003), pp. 325-334

Christensen, B.T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. *Advances in Soil Science*, New York, v.20, p.1-90, 1992.

Christensen, B.T. Matching measurable soil organic matter fractions with conceptual pools in simulation models of carbon turnover: revision of model structure. D.S. Powlson, P. Smith, J.U. Smith (Eds.), *Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing Long-Term Datasets*, Springer-Verlag, Berlin (1996), pp. 141-159

Christensen, B.T. Structure and organic matter storage in agricultural soils. In: Carter, M.R.; Stewart, B.A. (Ed.). *Structure and organic matter storage in agricultural soils* Boca Raton: CRC, 1996b. p.97-165

Christensen, B. T. Organic matter in soil – structure, function and turnover. *Dias Report no. 30*. Plant production, Tjele. p. 95, 2000.

Churchman, G. J., & Velde, B. (2019). *Soil Clays, Linking Geology, Biology, Agriculture, and the Environment*. Boca Raton, Florida, USA.

Churchman GJ, Singh M, Schapel A, Sarkar B, Bolan N (2020) Clay minerals as the key to the sequestration of carbon in soils. *Clay Miner* 68(2):135–143

Cornell, R.M.; Schwertmann, U. *The iron oxides: structure, properties, reactions, occurrence and uses*. New York: VCH Publishers, 1996. 573p.

Corrêa JC, Bull LT, Crusciol CAC, Moraes MH. 2009. Alteração de atributos físicos em Latossolo com aplicação superficial de escória de aciaria, lama cal, lodos de esgoto e calcário. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33 (3) :263- 272.

Cotrufo MF, Ranalli MG, Haddix ML, Six J, Lugato E (2019) Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. *Nat Geosci* 12(12):989–994

Darrah PR, Jones DL, Kirk GJD, Roose T (2006) Modelling the rhizosphere: a review of methods for ‘upscaling’ to the whole-plant scale. *Eur J Soil Sci* 57:13–25

Da Silva<sup>1</sup>, P. L. F., de Oliveira<sup>1</sup>, F. P., Pereira, W. E., Borba, J. O. de M., Tavares, D. D., Santos, T.E.D., Martins, A.F. Estoques de carbono e retenção hídrica em biomassa de gramíneas no agreste

da paraíba. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering* v. 13(2):155- 167, 2019.

Dick, D.P; Schwertmann, U. Microaggregates from oxisols and inceptisols: dispersion through selective dissolutions and physicochemical treatments. *Geoderma*, Amsterdam, v.74, p.49-63, 1996.

Duiker, S.W. Rhoton, F.E. Torrent, J. Smeck, N.E. Lal, R. Iron (hydr)oxide crystallinity effects on soil aggregation. *Soil Sci. Soc. Am. J*, 67 (2003), pp. 606-611

Duxbury, J.M.; Smith, M.S.; Doran, J.M. Soil organic matter as a source and a sink of plant nutrients. In: Coleman, D.C.; Oades, J.M.; Uehara, G. *Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems*. Honolulu: University of Hawaii, 1989. p.33-67.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. EMBRAPA Clima Temperado. Dinâmica da matéria orgânica no ambiente. Pelotas, RS. 2002. In: Documentos, 105.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solos. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 230 p., 2017.

Filizola, H. F.; Luiz, A.; Maia, A.; Hernani, L.C. Atributos físico-hídricos e estoque de carbono de solos de áreas sob irrigação em itaí, sp. *Revista de Estudos Ambientais*, [S.l.], v. 23, n. 2, p. 6-22, jun. 2022.

Fortin, D.; Leppard, Gary G.; Tessier, A. Characteristics of lacustrine diagenetic iron oxyhydroxides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 57, no. 18, p. 4391–4404, Sep. 1993.

Freixo, A. A.; de Machado, P. L. O. A.; Santos, H. P.; Silva, C. A.; Fadigas, F.S. Soil organic carbon and fractions of a Rhodic Ferrasol under the influence of tillage and crop rotation systems in southern Brazil. *Soil & Tillage Research*, v.64, p. 221-230, 2002.

Gee G, OR D. Particle-size analysis. In: Dane JH, Topp C, editors. *Methods of soil analysis: Physical methods*. Madison: Soil Science Society of America; 2002. p.255-93.

Gonçalves, J.O.; Fruto, C.M.; Barranco, M.J.; Oliveira, M.L.S.; Ramos, C.G. Recovery of Degraded Areas through Technosols and Mineral Nanoparticles: A Review. *Sustainability* 2022, 14, 993.

Guerinot ML, Yi Y (1994) Iron: nutritious, noxious, and not readily available. *Plant Physiol* 104:815–820

Heckman, K.; Grandy, A.S.; Gao, X.; Keiluweit, M.; Wickings, K.; Carpenter, K.; Chorover, J.; Rasmussen, G. Sorptive fractionation of organic matter and formation of organo-hydroxy-aluminum complexes during litter biodegradation in the presence of gibbsite. *Geochimica and Cosmochimica Acta*. London, v.121, p.667-83, nov. 2013.

Hafeez, F.; Spor, A.; Breuil, M-C.; Schwartz, C.; Martin-Laurent, F.; Philippot, L. Distribution of bacteria and nitrogen-cycling microbial communities along constructed Technosol depth-profiles. *J. Hazard Mater.*, 231–232 (2012), pp. 88-97, 10.1016/j.jhazmat.2012.06.041

Huerta-diaz, Miguel A.; Morse, John W. A quantitative method for determination of trace metal concentrations in sedimentary pyrite. *Marine Chemistry*, vol. 29, no. C, p. 119–144, Jan. 1990.

IUSS Working Group WRB. (2014). World reference base for soil resources 2014: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Rome: FAO

Kleber, M.; Nico, P. S.; Plante, A.; Filley, T.; Kramer, M.; Swanston, C.; Sollins, P. Old and stable soil organic matter is not necessarily chemically recalcitrant: implications for modeling concepts and temperature sensitivity. *Global Change Biology*, Oxford, v.17, n.2, p.1097-1107, jun. 2011.

Kleber, M.; Eusterhues, K.; Keiluweit, M.; Mikutta, C.; Mikutta, R.; Nico, P.S. Chapter One - Mineral–Organic Associations: Formation, Properties, and Relevance in Soil Environments. *Advances in Agronomy*, Academic Press, v.130, p.1-140, 2015.

Kögel-Knabner I, Guggenberger G, Kleber M, Kandeler E, Kalbitz K, Scheu S, Eusterhues K, Leinweber P (2008) Organo-mineral associations in temperate soils: integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry. *J Plant Nutr Soil Sci* 171(1):61–82

Köppen, W., Geiger, R. *Klimate der erde*. gotha: Verlag justus perthes. Wallmap 150cmx200cm. 1928.

Lal, R.; Negassa, W.; Lorenz, K. Carbon sequestration in soil. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 15, p. 79-86, 2015.

Lalonde, K., Mucci, A., Ouellet, A., & Gélinas, Y. (2012). Preservation of organic matter in sediments promoted by iron. *Nature*, 483(7388), 198–200.

Lehmann, J., Kleber, M. The contentious nature of soil organic matter. *Nature* 528, 60–68 (2015)

Lepsch, I. F. 19 lições de pedologia. São Paulo: oficina de textos, 2011.

Leue, M., Eckhardt, K.U., Ellerbrock, R.H., Gerke, H.H., Leinweber, P., 2016. Analyzing organic matter composition at intact biopore and crack surfaces by combining DRIFT spectroscopy and PyrolysisField Ionization Mass Spectrometry. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 179, 5–17.

Lynch, J.M. *The rhizosphere*. John Wiley & Sons Ltd. England. 1990. 45Rp

Lopez-Sangil L, Rovira P (2013) Sequential chemical extractions of the mineral-associated soil organic matter: An integrated approach for the fractionation of organo-mineral complexes. *Soil Biol Biochem* 62:57–67.

Lovley DR (2000) Fe (III) and Mn(IV) reduction. In: Lovley DR (ed) *Environmental microbe-metal interactions*. American Society of Microbiology, Washington, DC, pp 3–30

Lovley, D.R. Dissimilatory Fe (III) and Mn(IV) reduction *Microbiol. Rev.*, 55 (1991), pp. 259-287

Lower SK, Hochella MF, Beveridge TJ (2001) Bacterial recognition of mineral surfaces: nanoscale interactions between *Shewanella* and  $\alpha$ -FeOOH. *Science* 292:1360–1363

Lu, L. Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability (1st ed), Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering: Number 66, Elsevier, Sawston (2015)

Macías, F. (2004) - Recovery of degraded soils, waste reuse, and carbon sequestration: An integrated alternative for improving environmental quality. *Recursos Rurais*, vol. 1, p. 49-56.

Malavolta, E.; Boareto, A. E.; Paulino, V. T. Micronutrientes: uma visão geral. In: Ferreira, M. E.; Cruz, M. C. P. da (Org.). *Micronutrientes na agricultura*. Piracicaba: Potafos, 1991. p. 1-33

Mathew, I.; Shimelis, H.; Mutema, M.; Minasny, B.; Chaplot, V. Crops for increasing soil organic carbon stocks: a global meta analysis. *Geoderma*, v. 367, e114230, 2020.

Marschner, H. and V. Römheld. 1994. Strategies of plants for acquisition of iron. *Plant Soil* 165:261-274.

Mielniczuk J. Matéria orgânica e sustentabilidade dos sistemas agrícolas. In: SANTOS GA et al. eds. *Fundamentos da matéria orgânica do solo – ecossistemas tropicais e subtropicais*. 2.ed. Porto Alegre: Metrópole. p. 1- 5. 2008.

Mikutta R, Mikutta C, Kalbitz K, Scheel T, Kaiser K, Jahn R (2007) Biodegradation of forest floor organic matter bound to minerals via different binding mechanisms. *Geochim Cosmochim Acta* 71(10):2569–2590

Minasny B, Malone BP, McBratney AB, Angers DA, Arrouays D, Chambers A, Chaplot V, Chen ZS, Cheng K, Das BS, Field DJ, Gimona A, Hedley CB, Hong SY, Mandal B, Marchant BP, Martin M, McConkey BG, Mulder VL, O'Rourke S, Richer-de-Forges AC, Odeh I, Padarian J, Paustian K, Pan GX, Poggio L, Savin I, Stolbovoy V, Stockmann U, Sulaeman Y, Tsui CC, Vagen TG, van Wesemael B, Winowiecki L (2017). Soil carbon 4 per mille. *Geoderma* 292:59–86

Munner, M.; Oades, J. M. The role of Ca-organic interactions in soil aggregate stability. III. Mechanisms and models. *Australian Journal of Soil Research*, 29:411-423, 1989.

Oliveira, P. de; Kluthcouski, J.; Borghi, E.; CECCON, G.; Castro, G. S. A. Atributos da braquiária como condicionador de solos sob integração lavoura-pecuária e integração lavoura-pecuária-floresta. *EMBRAPA Rice & Beans*. 2015

Parton, W.J.; Schimel, D.S.; Cole, C.V.; Ojima, D.S. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.51, p.1173-1179, 1987.

Reddy, K.R.; DeLaune, R.D. *Biogeochemistry of Wetlands: Science and Applications* (1st ed.), CRC Press (2008)

Resende, A.V. de.; Giehl, J.; Simão, E. de P.; Abreu, S.C.; Ferreira, A. C. de B.; Borin, A.L.D.C.; Marriel, I.E.; Melo, I.G.; Marques, L. de S.; Neto, M.M.G. Créditos de nutrientes e matéria orgânica no solo pela inserção do capimbraquiária em sistemas de culturas anuais. *Embrapa Circular Técnica*, 2020. 30 p.

Reyes, I., Torrent, J., 1997. Citrate-Ascorbate as a Highly Selective Extractant for Poorly Crystalline Iron Oxides. *Soil Science Society of America Journal* 61, 1647–1654.

Rosa, R.; Sano, E. E.; Rosendo, J. S. Estoque de carbono em solos sob pastagens cultivadas na bacia hidrográfica do rio Paranaíba. *Sociedade e Natureza*, v. 26, n. 2, p. 333-351, 2014.

Rossi, C. Q.; Pereira, M.G.; Giácomo, S.G.; Betta, M. Poliodoro, J.C. Labile fractions of organic matter in cropping system with straw of brachiaria and sorghum. *Revista Ciência Agronômica*, v. 43, n. 1, p. 38-46, 2012.

Rowley, M.C., Grand, S. & Verrecchia, É.P. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon. *Biogeochemistry* 137, 27–49 (2018).

Rowley, M.C., Grand, S., Spangenberg, J.E. et al. Evidence linking calcium to increased organo-mineral association in soils. *Biogeochemistry* 153, 223–241 (2021).

Ruiz, F.; Sartor, L.R.; Júnior, V.S.S.; Dos Santos, J.C.B; Ferreira, T.O. Fast pedogenesis of tropical Technosols developed from dolomitic limestone mine spoils (se-brazil). *Geoderma*, [s. L.], 2020.

Ruiz, F.; Cherubin, M.; Ferreira, T.O. Soil quality assessment of constructed Technosols: towards the validation of a promising strategy for land reclamation, waste management and the recovery of soil functions. *Journal of Environmental Management*, [s. L.], 2020.

Sahrawat, K. L. Iron toxicity in wetland rice and the role of other nutrients. *Journal Plant Nutrition*, v. 27, p. 1471-1504, 2004.

Saidy, A. R.; Smernik, R. J.; Baldock, J. A.; Kaiser, K.; Sanderman, J.; Macdonald, L. M. Effects of clay mineralogy and hydrous iron oxides on labile organic carbon stabilization. *Geoderma*, Amsterdam, v.173, p.104-110, mar. 2012.

Sanderson EW, Jaiteh M, Levy MA, Redford KH, Wannebo AV, Woolmer G (2002) The human footprint and the last of the wild. *Bioscience* 52(10):891–904.

Séré, G.; Schwartz, C.; Ouvrard, S.; Renat, J-C.; Watteau, F.; Villemin, G et al. Early pedogenic evolution of constructed Technosols. *J. Soils Sediments*, 10 (2010), pp. 1246-1254

Silva, I. F.; Mielniczuk, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 20, p. 113-117, 1997.

Silva, A.A.; Costa, A. M., Lana, R.M.Q; Lana, A.M.Q. Teores de micronutrientes em pastagem de *brachiaria decumbens* fertilizada com cama de frango e fontes minerais. *Biosci. J.*, Uberlândia, v. 27, n. 1, p. 32-40, Jan./Feb. 2011

Smith, J.U.; Smith, P.; Monaghan, R.; MacDonald, A.J. When is a measured soil organic matter fraction equivalent to a model pool? *European Journal of Soil Science*, 53 (2002), pp. 405-416.



- Song, X. Wang, P., Van Zwieten, L. et al. Towards a better understanding of the role of Fe cycling in soil for carbon stabilization and degradation. *carbon res* 1, 5 (2022).
- Sowers, T.D., Stuckey, J.W. & Sparks, D.L. The synergistic effect of calcium on organic carbon sequestration to ferrihydrite. *Geochem Trans* 19, 4 (2018).
- Sposito, G. *The chemistry of soils*. New York, Oxford University, 1989. 277p.
- Sullivan, L.A. Soil organic matter, air encapsulation and water stable aggregation. *Journal of Soil Science*, Oxford, v.41, p.529-534, set. 1990.
- Schwertmann, U., & Latham, M. (1986). Properties of iron oxides in some new Caledonian oxisols. *Geoderma*, 39, 105–123.
- Schwertmann, U. & Kämpf, N. Óxidos de ferro jovens em ambientes pedogenéticos brasileiros. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 7:251 - 255, 1983.
- Schwertmann, U & Taylor, R.M. 1989. Iron oxides. In: J.B. Dixon, and S.B. Wees (eds). *Minerals in soil environments*. 2nd. ed. Soil Sci. Soc. Amer., Madison, WI. p 379-438.
- Tessier, A.; Campbell, P. G. C.; Bisson, M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, vol. 51, no. 7, p. 844–851, 1979.
- Wang, P.; Wang, J.; Zhang, H.; Dong, Y.; Zhang Y. The role of iron oxides in the preservation of soil organic matter under long-term fertilization. *J. Soils Sediments*, 19 (2019), pp. 588-598
- Wiseman, C. L. S.; Püttmann, W. Interactions between mineral phases in the preservation of soil organic matter. *Geoderma*, Amsterdam, v.134, p.109-118, set. 2006.
- Xu, M.; da Silva, E.B.; Gao, P.; Liao, R.; Wu, J.; Ma, J. Biochar impact on chromium accumulation by rice through Fe microbial-induced redox transformation. *J. Hazard. Mater.*, 388 (2019).
- Xuehao Zheng, Belay Tafa Oba, Han Wang, Chenbo Shen, Rui Zhao, Dan Zhao, Hui Ding. Organo-mineral complexes alter bacterial composition and induce carbon and nitrogen cycling in the rhizosphere. *Science of The Total Environment*, Volume 836, 2022.
- Yao, F. X. et al. Chemical changes in heavy metals in the leachates from Technosols. *Chemosphere*, v. 77, n. 1, p. 29–35, 2009a.
- Zhang, S.; Xue, X.; Liu, X.; Duan, P.; Yang, H.; Jiang, T.; D. Wang, R. Liu. Current situation and comprehensive utilization of iron ore tailing resources *J. Min. Sci.*, 42 (2006), pp. 403-408,
- Zhang JC, Zhang L, Wang P, Huang QW, Yu GH, Li DC, Shen QR, Ran W (2013) The role of non-crystalline Fe in the increase of SOC after long-term organic manure application to the red soil of southern China. *Eur J Soil Sci* 64(6):797–804