

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

Tecnossolos elaborados com resíduos da construção civil: potencial para a
recuperação de áreas degradadas

Thayana Azevedo Lopes

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

Piracicaba
2020

Thayana Azevedo Lopes
Engenheira Agrônoma

Tecnossolos elaborados com resíduos da construção civil: potencial para a recuperação de
áreas degradadas
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

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
2020

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

Lopes, Thayana Azevedo

Tecnossolos elaborados com resíduos da construção civil: potencial para a recuperação de áreas degradadas /Thayana Azevedo Lopes. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2020.

74 p.

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

1. Solos construídos 2. Resíduos sólidos 3. Restauração florestal 4. Espécies pioneiras 5. Qualidade do solo I. Título

*Aos meus amados pais, Fernando e Adriana,
pelo amor incondicional e
por sempre serem meu porto seguro.*

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida, por todo aprendizado e por me proporcionar tantos bons momentos.

Aos meus pais, Adriana e Fernando, minha avó Shirley e meu irmão Gustavo, por serem luz na minha vida e estarem sempre ao meu lado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Tiago Osório Ferreira pela oportunidade, por todos os ensinamentos e pelo exemplo de profissionalismo e dedicação à Ciência do Solo.

À minha “co-orientadora” e amiga Verónica pelo suporte científico durante todo o projeto de pesquisa e pelo apoio emocional nos momentos difíceis.

À todos da equipe GEPGEOQ pelo conhecimento compartilhado, por toda ajuda e pela amizade, especialmente Alexys, Hermano e Douglas.

Aos técnicos Rossi e Tirolez por todo suporte em laboratório, pela amizade e por sempre estarem dispostos a me ajudar.

Ao Prof. Dr. Flávio Bertin Gandara Mendes e ao Prof. Maurício Roberto Cherubin pelos conselhos e suporte científico.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro durante o projeto.

Ao Grupo de Apoio à Pesquisa e Extensão (GAPE) da ESALQ/USP por fornecer o fertilizante nitrogenado utilizado no projeto.

Ao meu namorado Paulo e minhas amigas Marina, Gabriela, Adélia, Ana Luísa, Talita, Naiara, Larissa e Ana Paula por tantas boas risadas e momentos de alegria durante estes anos.

Muito obrigada!

*“Nesses tempos de céus de cinzas e chumbos,
nós precisamos de árvores desesperadamente verdes”.*

Mário Quintana

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	10
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	11
REFERÊNCIAS	14
2. POTENCIAL DE TECNOSSOLOS ELABORADOS COM RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL PARA PERMITIR O CRESCIMENTO DE ÁRVORES NATIVAS DO BRASIL	17
RESUMO	17
ABSTRACT	18
2.1 INTRODUÇÃO	19
2.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
2.2.1 Composição dos Tecnoossosolos.....	21
2.2.2 Espécies arbóreas nativas	22
2.2.3 Experimento em casa de vegetação	23
2.2.4 Avaliações na casa de vegetação	24
2.2.5 Análises de solos.....	24
2.2.6 Análises de plantas	26
2.2.7 Análises estatísticas	26
2.3 RESULTADOS	27
2.3.1 Crescimento das plantas	27
2.3.2 Atributos dos Tecnoossosolos e do Solo	31
2.3.3 Nutrientes nas plantas.....	33
2.3.4 Análises discriminantes	36
2.4 DISCUSSÃO	38
2.5 CONCLUSÕES	42
REFERÊNCIAS	42
3. UM ÍNDICE DE QUALIDADE DO SOLO PARA TECNOSSOLOS ELABORADOS COM RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL	49
RESUMO	49
ABSTRACT	50
3.1 INTRODUÇÃO	51

3.2	MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.2.1	Experimento em casa de vegetação	53
3.2.2	Avaliações na casa de vegetação.....	54
3.2.3	Análises de solo	54
3.2.3.1	Análises químicas	54
3.2.3.2	Análises físicas	54
3.2.3.3	Análises microbiológicas.....	56
3.2.4	Desenvolvimento do IQS (Índice de Qualidade do Solo).....	56
3.2.5	Análises estatísticas	56
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
3.4	CONCLUSÕES	69
	REFERÊNCIAS.....	70

RESUMO

Tecnossolos elaborados com resíduos da construção civil: potencial para a recuperação de áreas degradadas

Os resíduos da construção civil (RCC) são gerados diariamente em grandes quantidades no Brasil e embora possam ser considerados inertes em sua maioria, a reutilização destes ainda é baixa. Uma alternativa para o reaproveitamento desses resíduos pode ser sua utilização na elaboração de Tecnossolos, que são solos que podem ser elaborados “sob medida”, com um propósito, através da mistura de vários resíduos. Estes solos são classificados pela Base de Referência Mundial para Recursos do Solo (WRB/FAO). Os Tecnossolos “sob medida” podem proporcionar condições físicas, químicas e biológicas adequadas para o crescimento de plantas. O objetivo do presente trabalho foi estudar o potencial de Tecnossolos formados a partir de RCC no estabelecimento e desenvolvimento de mudas de *Guazuma ulmifolia* Lam. (mutambo) e *Piptadenia gonoacantha* (Mart.) J. F. Macbr. (pau-jacaré), ambas espécies arbóreas nativas do Brasil amplamente utilizadas em projetos de restauração florestal, além da elaboração de um índice de qualidade de solo (IQS) para estes Tecnossolos. O experimento foi conduzido em casa de vegetação durante quatro meses. Os Tecnossolos foram elaborados com RCC, com e sem adição de composto orgânico. Além disso, poderiam ter ou não a adição de biofertilizante líquido comercial nestas combinações. Utilizou-se como controle um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico. Durante condução do experimento, mediu-se a altura e o diâmetro do caule ao nível do solo (DAS) das mudas a cada 15 dias, e no final avaliou-se a biomassa seca total das plantas e suas concentrações de macro e micronutrientes por espectroscopia de fluorescência de raios X por dispersão de energia (EDXRF). Nos solos foram analisados o pH, cátions trocáveis, carbono orgânico total, densidade do solo, granulometria, entre outros atributos químicos e físicos. Além disso, foram realizadas análises microbiológicas, como atividades enzimáticas e carbono da biomassa microbiana. Através destas análises foi possível a seleção de indicadores para a elaboração do IQS. Os resultados demonstraram que as plantas de mutambo cresceram mais em altura e obtiveram maior produção de biomassa total em todos os Tecnossolos do que no solo controle, enquanto que as plantas de pau-jacaré apresentaram o mesmo crescimento em altura e a mesma produção total de biomassa nos Tecnossolos e no solo. Os Tecnossolos apresentaram um IQS maior que o solo controle, sendo que os Tecnossolos com RCC e composto orgânico apresentaram os maiores índices, evidenciando que além dos RCC fornecerem elementos químicos essenciais para as plantas, a presença do composto orgânico aumenta tanto as concentrações destes nutrientes e do carbono orgânico total nos solos, quanto as atividades das enzimas presentes e do carbono da biomassa microbiana. Os resultados mostraram que os Tecnossolos elaborados com RCC, com ou sem adição de composto orgânico, têm potencial para permitir o crescimento de árvores nativas do Brasil em áreas onde houve perda ou degradação de solo, além de evidenciar que é possível a construção de solos artificiais a partir de resíduos da construção civil (RCC) com qualidade comparável ou superior à de solos naturais.

Palavras-chave: Solos construídos, Resíduos sólidos, Restauração florestal, Espécies pioneiras, Qualidade do solo

ABSTRACT

Technosols made of construction debris: potential for the improvement of degraded areas

Construction and demolition debris (C&DD) are generated daily in large quantities in Brazil and, although they can be mostly considered inert, their reuse is still low. An alternative for the reuse of these residues may be their use in the elaboration of Technosols, which are soils that can be made for one purpose by mixing various wastes. These soils are classified by the World Reference Base for Soil Resources (WRB / FAO). The customized Technosols can provide physical, chemical and biological conditions for plant growth. The objective of the present work was to study the potential of these Technosols made of C&DD in the establishment and development of *Guazuma ulmifolia* Lam. (mutambo) and *Piptadenia gonoacantha* (Mart.) J. F. Macbr. (pau-jacaré), which are native tree species from Brazil widely used in forest restoration projects, besides the creation of an SQI for these Technosols. The experiment was conducted in a greenhouse for four months. The Technosols were prepared with C&DD, with and without the addition of compost. In addition, they have or not a liquid biofertilizer. A Ferralsol was used as control. The height and diameter of the stem were measured every 15 days, and at the end of the experiment, the total dry biomass of the plants and their macro and micronutrient concentrations were analyzed by energy dispersion X-ray fluorescence spectroscopy. Soils were analyzed for pH, exchangeable cations, total organic carbon, soil density, granulometry, among other chemical and physical attributes. In addition, microbiological analyzes were carried out, such as enzymatic activities and carbon from microbial biomass. Through these analyzes it was possible to select indicators for the creation of the IQS. Results showed that mutambo plants grew more in height and obtained higher total biomass production in all Technosols than in the control soil, while pau-jacaré plants presented the same height and the same total biomass production in both Technosols and soil. The Technosols had an SQI higher than the control soil, and the Technosols with C&DD and compost presented the highest indexes, showing that C&DD provided essential chemical elements to plants and, in addition, the presence of compost increases both the concentrations of these nutrients and total organic carbon in soils, as well as the activities of the enzymes and carbon microbial biomass. These results showed that the Technosols made of C&DD, with or without the addition of compost, have the potential to allow the growth of native Brazilian trees in areas where there was loss or degradation of soil, in addition to showing that it is possible to build artificial soils from C&DD with comparable or superior quality to natural soils.

Keywords: Constructed soils, Residues, Forest restoration, Pioneer species, Soil quality

1. INTRODUÇÃO GERAL

A construção civil é geradora de impactos ambientais devido ao intenso consumo de recursos naturais para produzir os materiais utilizados, além da geração de uma grande quantidade de resíduos após seu uso ou demolição. A Resolução nº 307 de 5 de julho de 2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) definiu os resíduos da construção civil (RCC) como “aqueles provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos” (Brasil, 2002). No Brasil, a maior parte dos RCC são compostos por tijolos, blocos cerâmicos, argamassa, concreto e solos. Em menor quantidade podem conter brita, gesso, vidro, madeira, plásticos, papel e papelão (Bernardes et al., 2008).

Os resíduos da construção civil (RCC) representam um grave problema em muitas cidades do Brasil e do mundo porque sua disposição irregular pode gerar problemas de ordem ambiental, estética e de saúde pública. Por outro lado, podem sobrecarregar os sistemas de limpeza pública municipais (Bernardes et al., 2008). Estima-se que no Brasil são coletadas mais de 45 milhões de toneladas de RCC por ano, resultando cerca de 0,60 kg de RCC/habitante por dia (Abrelpe, 2017). Apesar de considerados como resíduos de baixa periculosidade, os RCC, devido ao grande volume gerado, consistem em um problema ambiental uma vez que precisam ser depositados adequadamente. Em 2002, a Resolução 307 do CONAMA (Brasil, 2002), alterada pela Resolução 348 de 2004 (Brasil, 2004), determinou que o gerador dos resíduos da construção civil seria o responsável pelo gerenciamento dos mesmos. Esta determinação representa um avanço legal e técnico, atribuindo responsabilidades aos geradores de resíduos, que devem assumir sua separação em diferentes classes e o seu encaminhamento para reciclagem e disposição final adequada em aterros de resíduos classe A. Contudo, o destino final da maior parte dos RCC ainda são os lixões e aterros inertes (Brasil, 2002). Entretanto, poucos são os municípios do Brasil que têm unidades de reciclagem para esses tipos de resíduos (Brasil, 2018). No Brasil, o reaproveitamento desses resíduos é realizado principalmente com sua utilização como material para a mistura asfáltica e elaboração de concreto reciclado, porém em pequena quantidade (Brasileiro e Matos, 2015).

Nas últimas décadas, diversos estudos demonstraram a viabilidade da reutilização de resíduos para a construção de solos buscando a recuperação de áreas degradadas, contaminadas, ou o aumento da fertilidade em áreas agrícolas. Os resíduos utilizados incluem lodos de esgoto, cinzas originadas em fábricas de papel, vinhaça, restos de alimentos, conchas de animais marinhos, dentre muitos outros (Ijah and Ndana, 2003; Calace et al., 2005; Benchimol et al., 2006; Battaglia et al., 2007; Bertoncini et al., 2008; Asensio et al., 2013). Alguns autores testaram a periculosidade do uso de resíduos moídos de concreto no solo (DeSutter et al., 2011; Kluge et al., 2018), porém sem avaliar se podem melhorar a qualidade de solos degradados.

O uso de resíduos, individualmente, ou em mistura, depois de meses em contato com solo e sob vegetação, podem ser considerados solos ou um novo horizonte superficial, devido às transformações físico-químicas e biológicas que sofrem durante esse período (Asensio et al., 2013; Huot et al., 2015). Os solos originados são classificados como Tecnossolos (Technosol) segundo a World Reference Base for Soil Resources (WRB) (IUSS Working Group WRB, 2014).

A classificação desses solos como Tecnossolos é recente (FAO, 2006) e segundo esta classificação, os Tecnossolos devem conter 20% ou mais de materiais tecnogênicos nos primeiros 100 cm da superfície do solo ou a rocha contínua ou uma camada cimentada. Geralmente, os solos urbanos e ou gerados por atividades de mineração são classificados como Tecnossolos. Os Tecnossolos podem ser elaborados com um propósito determinado como é o caso daqueles construídos a partir de resíduos utilizados na recuperação de áreas degradados como substrato para o crescimento de plantas (Séré et al., 2010; Hafeez et al., 2012; Asensio et al., 2013), especialmente nos casos onde não há mais solo presente (i.e. cavas abandonadas ou exauridas de mineração).

A pesquisa sobre o uso de Tecnossolos na recuperação de espaços degradados ainda é recente (primeiro estudo em 2007; Figura 1) com apenas cerca de 217 trabalhos sobre o tema até o ano de 2018, sendo a maioria deles publicados na forma de artigos científicos (www.scopus.com). Durante estes 11 anos houve um aumento progressivo no número de publicações, entretanto com um número máximo de trabalhos por ano reduzido (de 68 trabalhos de acordo com a base Scopus; www.scopus.com). Estes dados demonstram que apesar de ser um tema ainda pouco abordado, há um interesse crescente sobre Tecnossolos ao redor do mundo.

O levantamento na base de dados foi realizado a partir do termo “Technosol”, em inglês devido a preponderância deste idioma na comunicação científica mundial. Foram selecionados trabalhos cujo termo constava nos títulos, nos resumos e nas palavras-chaves, em todas as áreas de conhecimento da base de dados do Scopus e em todos os tipos de documentos, além do período de busca ser delimitado de 2007 a 2018. O ano selecionado como inicial foi determinado devido ao primeiro registro daquele termo no banco de dados do Scopus.

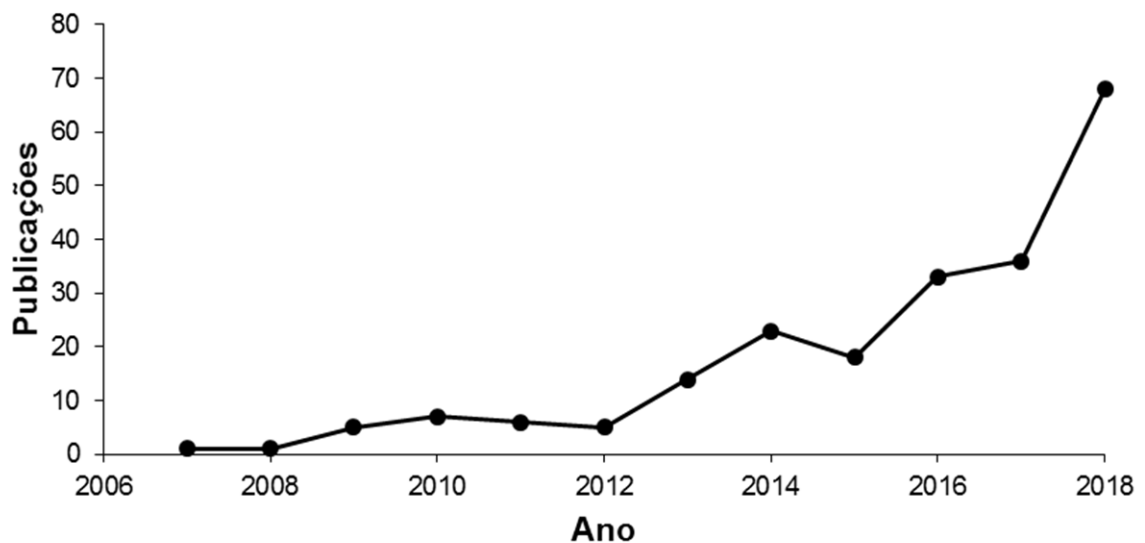


Figura 1. Número de publicações sobre Tecnosolos por ano.

Os países do hemisfério norte concentram a maior parte dos estudos (França, Espanha, Alemanha, Federação Russa, Polônia, Itália, e Estados Unidos) sobre o tema enquanto o Brasil se encontra em oitavo lugar com apenas 11 publicações durante o período de 2007 a 2018 (Figura 2).

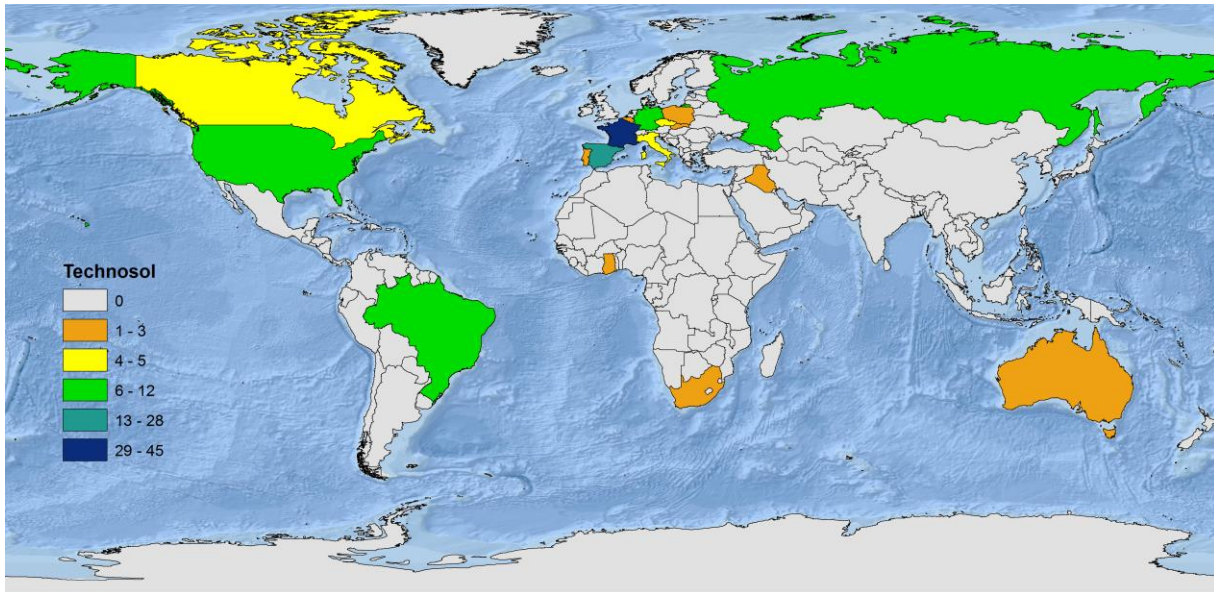


Figura 2. Número de publicações sobre Tecnossolos por países durante o período de 2007 a 2018.

Visto o crescente interesse e a escassez de estudos relacionados a Tecnossolos no Brasil, bem como os problemas ambientais envolvidos na destinação dos RCC, o presente trabalho buscou atrelar estes dois temas. Apesar da enorme quantidade disponível de RCC e de sua baixa periculosidade para o meio ambiente, o uso deste tipo de resíduo para melhorar a qualidade de solos ou mesmo produzir solos para o crescimento de plantas e recuperar áreas degradadas ainda não foi estudado.

Desta forma, o presente estudo teve como objetivos: (i) avaliar o potencial de Tecnossolos elaborados a partir de RCC em promover o crescimento de espécies arbóreas nativas e (ii) aferir a qualidade de Tecnossolos construídos a partir de RCC quando comparados a solos naturais. Além disso, apresentou as seguintes hipóteses: (i) Tecnossolos construídos à base de resíduos da construção civil são capazes de permitir o crescimento de espécies arbóreas nativas do Brasil e (ii) Tecnossolos elaborados a partir de resíduos da construção civil têm qualidade comparável ou superior a de solos naturais.

REFERÊNCIAS

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. <https://doi.org/10.1002/etc.2315>

Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE. Panorama Nacional dos Resíduos Sólidos 2017. São Paulo, 2017.

Disponível em <http://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 19 de setembro de 2019.

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.10.007>
- 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. <https://doi.org/10.1590/S0100-41582006000200009>
- Bernardes, A., Thomé, A., Prietto, P.D.M., de Abreu, A.G., 2008. Quantificação e classificação dos resíduos da construção e demolição coletados no município de Passo Fundo, RS. *Ambient. Construído* 8, 65–76.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.024>
- BRASIL. CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União, Brasília, DF. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/-index.cfm>>
- BRASIL. CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 348, de 16 de agosto de 2004. Altera a resolução CONAMA nº 307, de 05 de julho de 2002, incluindo amianto na classe de resíduos perigosos. Diário Oficial da União, Brasília, DF. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/-index.cfm>>
- BRASIL. Ministério das Cidades, 2018. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2018. Brasília, Brazil.
- Brasileiro, L.L., Matos, J.M.E., 2015. Revisão bibliográfica : reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. *Cerâmica* 61, 178–189. <https://doi.org/10.1590/0366-69132015613581860>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.12.014>
- DeSutter, T., Goosen-Alix, P., Prunty, L. (2011) Smooth brome (*Bromus inermis* Leyss) and soil chemical response to concrete grinding residue application. *Water, Air, & Soil Pollution* 222: 195–204.
- FAO, 2006. World Reference Base for Soil Resources. IUSS, ISRIC, FAO, Rome.

- Hafeez, F., Spor, A., Breuil, M.-C., Schwartz, C., Martin-Laurent, F., Philippot, L., 2012. Distribution of bacteria and nitrogen-cycling microbial communities along constructed Technosol depth-profiles. *J. Hazard. Mater.* 231–232, 88–97. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.06.041>
- Huot, H., Simonnot, M., Morel, J.L., 2015. Pedogenetic Trends in Soils Formed in Technogenic Parent Materials. *Soil Sci.* 180, 182–192. <https://doi.org/10.1097/SS.000000000000135>
- Ijah, U.J.J., Ndana, M., 2003. Stimulated biodegradation of crude oil in soil amended with periwinkle shells. *Environmentalist* 23, 249–254. <https://doi.org/10.1023/B:ENVR.0000017379.37520.f2>
- 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, Italy.
- Kluge, M., Gupta, N., Watts, B., Chadik, P.A., Ferraro, C., Townsend, T.G., 2018. Characterisation and management of concrete grinding residuals. *Waste Manag. Res.* 36, 149–158. <https://doi.org/10.1177/0734242X1774>
- Séré, G., Schwartz, C., Ouvrard, S., Renat, J.-C., Watteau, F., Villemin, G., Morel, J.L., 2010. Early pedogenic evolution of constructed Technosols. *J. Soils Sediments* 10, 1246–1254. <https://doi.org/10.1007/s11368-010-0206-6>

2. CRESCIMENTO DE ESPÉCIES ARBÓREAS NATIVAS DO BRASIL EM TECNOSSOLOS FORMADOS A PARTIR DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

RESUMO

Os resíduos da construção civil (RCC) são gerados diariamente em grandes quantidades no Brasil e embora possam ser considerados inertes em sua maioria, a reutilização destes ainda é baixa. Uma alternativa para o reaproveitamento desses resíduos pode ser sua utilização na elaboração de Tecno solos, que são solos que podem ser formados “artificialmente” através da combinação de vários tipos de resíduos. Estes solos são classificados pela Base de Referência Mundial para Recursos do Solo (WRB/FAO). O objetivo do presente trabalho foi estudar o potencial destes Tecno solos construídos com RCC no estabelecimento e desenvolvimento de mudas de *Guazuma ulmifolia* Lam. (mutambo) e *Piptadenia gonoacantha* (Mart.) J. F. Macbr. (pau-jacaré). Estas espécies arbóreas nativas do Brasil são amplamente utilizadas em projetos de restauração florestal. O experimento foi conduzido em casa de vegetação durante quatro meses. Os Tecno solos foram elaborados com RCC, com e sem adição de composto orgânico. Além disso, poderiam ter ou não a adição de biofertilizante líquido comercial nestas combinações. Utilizou-se como controle um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico. Durante condução do experimento, mediu-se a altura e o diâmetro do caule ao nível do solo (DAS) das mudas a cada 15 dias, e no final avaliou-se a biomassa seca total das plantas e suas concentrações de macro e micronutrientes por espectroscopia de fluorescência de raios X por dispersão de energia (EDXRF). Nos solos foram analisados o pH, cátions trocáveis, carbono orgânico total, entre outros atributos químicos, além da concentração de alguns elementos químicos biodisponíveis. Os resultados demonstraram que as plantas de mutambo cresceram mais em altura e obtiveram maior produção de biomassa total em todos os Tecno solos do que no solo controle, enquanto que as plantas de pau-jacaré apresentaram o mesmo crescimento em altura e a mesma produção de biomassa total nos Tecno solos e no solo. Os Tecno solos com composto orgânico forneceram as plantas maiores concentrações de macro, micronutrientes e carbono orgânico total. Os resultados mostraram que os Tecno solos elaborados com RCC, com ou sem adição de composto orgânico, têm potencial para permitir o crescimento de árvores nativas do Brasil em áreas onde houve perda ou degradação de solo.

Palavras-chave: Áreas degradadas, Pau-jacaré, Mutambo, Pioneiras, Biomassa vegetal, Solos degradados.

ABSTRACT

Construction and demolition debris (C&DD) are generated daily in large quantities in Brazil and, although they can be mostly considered inert, their reuse is still low. An alternative for the reuse of these residues may be their use in the elaboration of Technosols, which are soils that can be “artificially” constructed by combining various types of waste. These soils are classified by the World Reference Base for Soil Resources (WRB / FAO). The objective of the present work was to study the potential of these Technosols made of C&DD in the establishment and development of *Guazuma ulmifolia* Lam. (mutambo) and *Piptadenia gonoacantha* (Mart.) J. F. Macbr. (pau-jacaré). These native tree species from Brazil are widely used in forest restoration projects. The experiment was conducted in a greenhouse for four months. The Technosols were prepared with C&DD, with and without the addition of compost. In addition, they have or not a liquid biofertilizer. A Ferralsol was used as control. While conducting the experiment, the height and diameter of the stem were measured every 15 days, and at the end, the total dry biomass of the plants and their macro and micronutrient concentrations were analyzed by energy dispersion X-ray fluorescence spectroscopy. Soils were analyzed for pH, exchangeable cations, total organic carbon, among other chemical attributes, as well as the concentration of some bioavailable chemical elements. Results showed that mutambo plants grew more in height and obtained higher total biomass production in all Technosols than in the control soil, while pau-jacaré plants presented the same height and the same total biomass production in both Technosols and soil. The Technosols with compost provided higher concentrations of macro, micronutrients and total organic carbon to plants. These results showed that the Technosols made of C&DD, with or without the addition of compost, have the potential to allow the growth of native Brazilian trees in areas where there was loss or degradation of soil.

Keywords: Degraded areas, Pau-jacaré, Mutambo, Pioneer species, Plant biomass, Degraded soils

2.1 INTRODUÇÃO

A fim de evitar a perpetuação de danos ambientais já existentes, inúmeras iniciativas de recuperação de áreas degradadas foram estabelecidas em todo o mundo para atenuar a degradação ambiental por ação antrópica e favorecer a restauração ecológica de ecossistemas (Brançalion, 2013). Nesse contexto, tem-se procurado desenvolver metodologias de recuperação eficientes, facilmente aplicáveis, de baixo custo e que sejam capazes de prevenir ou mitigar, os impactos negativos sobre as funções ambientais (Benayas et al., 2009).

A recuperação de solos degradados é um fator primordial para que ocorra o restabelecimento de um ecossistema funcional, uma vez que é no ambiente edáfico que há o estabelecimento e desenvolvimento da vegetação, a qual propicia o retorno da fauna e por conseguinte os processos ecológicos.

Gómez-Pompa e Wiechers (1979) já alertavam sobre a importância dos solos na recuperação de ecossistemas tropicais e subtropicais. Todos os fatores do sistema solo-planta devem ser abordados cuidadosamente para haver sucesso na restauração de áreas degradadas, uma vez que os processos que ocorrem no solo conduzem os aspectos observados acima deste (i.e. crescimento das plantas) (Kelly e Samways, 2003; Gu et al., 2019).

Áreas severamente erodidas, cavas abandonadas ou exauridas de mineração, cortes de estradas e nivelamento de terrenos em canteiros de obras são exemplos de áreas onde as perdas de solo são significativas, muitas vezes com perda completa do perfil. Nestes cenários, a perda completa do banco de sementes, nutrientes e matéria orgânica, dificulta o restabelecimento bem sucedido da vegetação nativa. Além disso, embora possa haver fragmentos florestais ao redor destas áreas e agentes dispersores contribuindo para a deposição de sementes de espécies florestais, a revegetação espontânea desses locais normalmente não ocorre (Chaer et al., 2010).

Sendo assim, uma das etapas importantes para a revegetação de áreas severamente degradadas onde há perda completa de solos é a própria elaboração de um substrato para o crescimento das plantas. Neste contexto, uma opção é o uso de solos elaborados “artificialmente” através da combinação de resíduos provenientes de atividades humanas (Tecnossolos), a fim de proporcionar condições adequadas para o crescimento das plantas (Seré et al., 2008). Os Tecnossolos

constituem um novo grupo de solos na Base de Referência Mundial para Recursos do Solo (FAO, 2014) a qual destaca que estes solos devem conter 20% ou mais (em volume) de artefatos (origem antropogênica) nos primeiros 100 cm da superfície do solo ou a rocha contínua ou uma camada cimentada. Além disso, solos provenientes de resíduos (aterros sanitários, lodo, cinzas, detritos e rejeitos de minas), pavimentos com seus materiais não consolidados subjacentes, solos com geomembranas e solos construídos também são classificados como Tecnossolos (FAO, 2014).

No Brasil, cerca de 123 toneladas de resíduos da construção civil (RCC) são coletadas diariamente pelos municípios (Abrelpe, 2017). Tendo em vista a baixa reciclagem e reutilização dos RCC, seu uso na elaboração de Tecnossolos, como uma alternativa para a revegetação de áreas degradadas, consiste em uma estratégia ambientalmente adequada para o restabelecimento dos processos ecológicos nestes locais.

De acordo com Pérez-Gimeno et al. (2019), quando há a aplicação de qualquer tipo de resíduo para melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas de solos, vários aspectos devem ser considerados, como a disponibilidade dos resíduos, suas características físicas e químicas e a logística de transporte. Desta forma, esta nova alternativa de uso do RCC além de considerar os fatores ambientais, como o gerenciamento adequado destes resíduos, também dá importância aos fatores econômicos e operacionais, uma vez que trata-se de uma alternativa de baixo custo e fácil execução.

No entanto, apesar da enorme quantidade disponível de RCC e de sua baixa periculosidade para o meio ambiente, o uso deste tipo de resíduo não é uma prática comum na recuperação de áreas degradadas. Embora, alguns autores tenham testado a periculosidade da aplicação de resíduos moídos de concreto no solo (DeSutter et al., 2011; Kluge et al., 2018), estes não avaliaram se houve uma melhora na qualidade dos solos degradados ou se estes conseguiam sustentar o crescimento adequado da vegetação.

Face a importância e a carência de estudos relacionados ao tema, o presente trabalho objetivou avaliar o potencial de Tecnossolos elaborados a partir de RCC em promover o crescimento de espécies arbóreas nativas. Além disso, contou com a seguinte hipótese: Tecnossolos construídos à base de resíduos da construção civil são capazes de permitir o crescimento de espécies arbóreas nativas do Brasil.

2.2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.2.1 Composição dos Tecnosolos

Os Tecnosolos foram elaborados a partir de resíduos da construção civil, provenientes do município de Piracicaba, com duas granulometrias: partículas com diâmetro menor que 2mm (material fino) e partículas/fragmentos com diâmetro maior do que 2mm (material grosso), composto orgânico comercial (casca de eucalipto, casca de pinus, borra de café, casca de ovo, lodo orgânico e resíduos vegetais) e biofertilizante líquido comercial (composto por diversas bactérias).

Os resíduos da construção civil (RCC) foram obtidos através de uma empresa privada que recolhe estes resíduos depositados em Ecopontos no município de Piracicaba e realiza o beneficiamento. Desta forma, há a separação de materiais como plásticos, madeira, papelão, gesso, vidro e resíduos de podas de árvores, que são encontrados misturados com os RCC. Feito esta triagem, os RCC são encaminhados para um triturador resultando nas duas granulometrias que foram utilizadas neste estudo. Foram coletados cerca de 8 sacos de 20 kg no total de RCC, sendo 2 sacos de materiais com diâmetro maior do que 2mm e 6 sacos de materiais com diâmetro menor que 2mm.

As proporções em peso dos materiais utilizados para a confecção dos Tecnosolos foram as seguintes:

- Tecnosolo 1 (TEC1): 100% resíduos da construção civil (RCC), sendo 85% de material fino e 15% de material grosso;
- Tecnosolo 2 (TEC2): 100% resíduos da construção civil (RCC), sendo 85% de material fino e 15% de material grosso e biofertilizante líquido comercial;
- Tecnosolo 3 (TEC3): 60% resíduos da construção civil, sendo 85% de material fino e 15% de material grosso, e 40% de composto orgânico comercial;
- Tecnosolo 4 (TEC4): 60% resíduos da construção civil, sendo 85% de material fino e 15% de material grosso, 40% de composto orgânico comercial e biofertilizante líquido comercial.

Os componentes de cada Tecnosolo foram misturados manualmente em uma lona plástica com o auxílio de uma pá. Em seguida, vasos de polietileno forrados com sacos plásticos foram preenchidos com os Tecnosolos elaborados e pesados até atingirem o peso de 5kg por vaso (Figura 1).

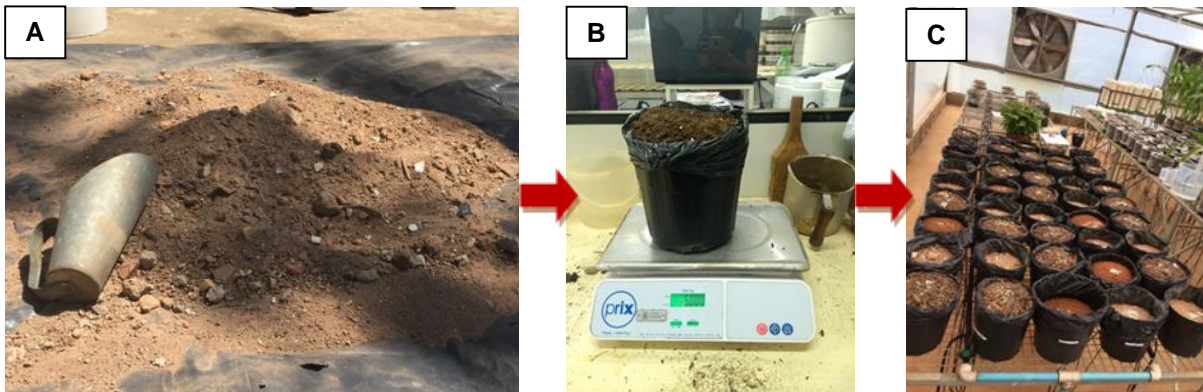


Figura 1. Sequência da montagem dos vasos: **(A)** mistura dos componentes do Tecnosolo, **(B)** pesagem do Tecnosolo no vaso e **(C)** distribuição dos vasos na casa de vegetação.

2.2.2 Espécies arbóreas nativas

Para o experimento foram utilizadas as espécies arbóreas *Guazuma ulmifolia* Lam. e *Piptadenia gonoacantha* (Mart.) J. F. Macbr.

A espécie *Guazuma ulmifolia* Lam., é conhecida popularmente no Estado de São Paulo como mutambo e destaca-se como uma espécie arbórea pertencente à família Sterculiaceae e de ocorrência natural em quase todo o Brasil, distribuindo-se desde a Amazônia até o Paraná (Carvalho, 2007). É encontrada em áreas do Bioma Mata Atlântica, Cerrado, Amazônia, Caatinga e Pantanal. O mutambo foi selecionado para o estudo por ser uma espécie pioneira (estágio inicial de sucessão ecológica em floresta) amplamente utilizada em projetos de recuperação de áreas degradadas uma vez que possui crescimento rápido, frutos apreciados pela fauna, baixa exigência nutricional e habita tanto locais secos quanto úmidos, principalmente solos de textura arenosa (Lorenzi, 2002; Souza e Batista, 2004; Carvalho, 2007; Brancalion et al., 2010). De acordo com resultados de Pires et al (2018) esta espécie apresenta características de tolerância a condições de má drenagem.

O mutambo ainda é utilizado para alimentação animal (forragem), alimentação humana (frutos e sementes), energia, madeira, medicamentos, cosméticos, paisagismo, entre outros fins. (Almeida et al., 1998; Manríquez-Mendoza et al., 2011; Cediél-Devia et al., 2019).

O pau-jacaré, *Piptadenia gonoacantha* (Mart.) J. F. Macbr., da família Mimosaceae destaca-se como uma espécie fixadora de nitrogênio, pioneira de crescimento rápido e também bastante empregada em projetos de restauração florestal. Ocorre naturalmente tanto em solos de baixa fertilidade química quanto

alta, abrangendo os biomas Mata Atlântica e Cerrado. É encontrada em diversos estados do Brasil, como Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná, entre outros (Carvalho, 2004). Dentre suas diversas utilidades, o pau-jacaré possui atributos ornamentais sendo utilizado em projetos paisagísticos, além de sua madeira ser adequada para a produção de celulose, papel, lenha e carvão vegetal (Carvalho, 2004; Ferreira et al., 2007; Hernández, W. et al., 2012; Góes e Quintela, 2015).

2.2.3 Experimento em casa de vegetação

O experimento foi conduzido de outubro de 2018 a fevereiro de 2019 em casa de vegetação. As mudas das espécies arbóreas nativas mutambo e pau-jacaré foram plantadas em vasos de polietileno, forrados com sacos plásticos (para evitar a perda de solo), com os Tecno solos elaborados e também com um solo classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS, EMBRAPA, 2018) como tratamento controle. Todos os tratamentos foram conduzidos em triplicatas e os vasos foram distribuídos aleatoriamente. As mudas em tubetes de papéis biodegradáveis (ellepot), em substrato contendo turfa canadense, casca de arroz carbonizada e vermiculita, foram obtidas no viveiro Camará (Ibaté-SP). Após o plantio das mudas, todos os tratamentos foram adubados com 80 mg kg⁻¹ de N na forma de ureia, de acordo com a recomendação de adubação descrita por Malavolta (2006).

A irrigação foi calculada a partir das médias mensais (outubro, novembro, dezembro e janeiro) de precipitações durante os últimos 5 anos do município de Piracicaba/SP em relação ao tamanho do vaso (20 cm de diâmetro e 20 cm de altura), totalizando 60 regas de 360 mL. Em dias alternados e durante 4 meses, os vasos foram irrigados com 360 mL de água deionizada, exceto no primeiro dia de plantio e após 1 mês. Nestes dois dias, as mudas foram irrigadas com 240 mL de água deionizada e nos tratamentos que incluíam a aplicação do biofertilizante líquido comercial, foram utilizados 240 mL de água deionizada + 12 mL de produto para atender a dosagem recomendada do fabricante de 400 L ha⁻¹ para mudas de espécies arbóreas nativas de reflorestamento.

2.2.4 Avaliações na casa de vegetação

As avaliações de altura (cm) e diâmetro do caule ao nível do solo (DAS) (mm) das espécies arbóreas foram feitas aos 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 e 120 dias após o plantio, com o auxílio de uma régua graduada e um paquímetro digital. Foram determinadas a biomassa seca dos caules+galhos, folhas e raízes de 3 mudas de cada espécie antes do início do experimento.

2.2.5 Análises de solos

Após fim do experimento em casa de vegetação, os Tecnosolos e o solo controle foram secos ao ar (cerca de 15 dias) e em seguida, foram peneirados em peneiras com malha de 2 mm.

Posteriormente se procedeu as análises químicas dos solos de todos os tratamentos (inclusive dos materiais utilizados na elaboração dos Tecnosolos e do solo controle no início do experimento - Tabela 1). A determinação de pH em água e KCl foi realizada utilizando-se a proporção 1:2,5 (peso:volume) com o uso de pHmetro; as concentrações de potássio (K^+) e sódio (Na^+) disponíveis, extraídos com solução Mehlich-1 e determinados por um espectrofotômetro de chama; as concentrações de cátions trocáveis (Al^{3+} , Ca^{2+} e Mg^{2+}), extraídos com KCl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ (Al^{3+} determinado por titulação; Ca^{2+} e Mg^{2+} determinados por um espectrômetro de absorção atômica); acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$), extraída com solução de acetato de cálcio $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ em pH 7,0 e determinada por titulação (EMBRAPA, 2017). Com os resultados, calculou-se a soma de bases trocáveis ($SB = Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+$), CTC efetiva ($CTCe = SB + Al^{3+}$) e CTC total ($CTCt = SB + H^+ + Al^{3+}$) e as porcentagens de saturação por bases ($V\% = (100 \cdot SB) / CTCt$), saturação por alumínio ($m = (100 \cdot Al^{3+}) / (SB + Al^{3+})$) e saturação por sódio (Saturação po sódio = $(100 \cdot Na^+) / CTCt$) (EMBRAPA, 2017). As concentrações de ferro (Fe), cobre (Cu), manganês (Mn), zinco (Zn), enxofre (S) e fósforo (P) foram determinadas pela extração com Mehlich-3 de acordo com Mehlich (1984) e subsequente leitura dos extratos em um espectrômetro de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES). No caso do P as leituras foram feitas em um colorímetro usando o comprimento de onda de 880 nm. A quantificação do carbono orgânico total (COT) nos solos foi realizada pelo método de via úmida de Walkley-Black (Nelson e Sommers, 1982). Os resultados de equivalente de carbonato de cálcio das

amostras foram determinados de acordo com a EMBRAPA (2017), por ataque ácido com solução padrão de HCl 0,5 mol L⁻¹ e posterior titulação do excesso de ácido com solução de NaOH 0,25 mol L⁻¹.

Para a análise granulométrica, as amostras foram previamente submetidas ao pré-tratamento com peróxido de hidrogênio para remoção de matéria orgânica. Em seguida, utilizou-se como dispersante, uma solução de hexametáfosfato de sódio 0,038 mol L⁻¹ + hidróxido de sódio 0,1 mol L⁻¹. A fração areia foi separada por peneiramento (malha 0,053 mm) e as frações argila e silte pelo método do densímetro (Gee e Or, 2002).

Os atributos químicos dos materiais utilizados para a elaboração dos Tecossolos, assim como os do solo controle, estão detalhados na Tabela 1.

Tabela 1. Atributos químicos dos resíduos, da mistura e do solo controle no início do experimento - RCC (resíduos da construção civil); RCC+C.O (60% RCC + 40% composto orgânico comercial) e SOLO (Latosolo Vermelho-Amarelo distrófico típico).

Atributos químicos	Unidade	RCC	RCC+C.O	SOLO
pH água		8,20±0,02	7,28±0,07	4,86±0,13
pH KCl		7,89±0,23	7,21±0,14	4,18±0,04
Equivalente de CaCO ³	g kg ⁻¹	142±13,3	168±4,09	58,8±5,93
COT		4,61±0,00	416±49,7	3,28±0,94
Ca ²⁺		405±37,7	530±47,7	5,31±0,63
Mg ²⁺		9,23±0,09	62,7±3,43	4,13±0,10
Na ⁺		5,87±0,31	101±0,87	2,55±0,05
K ⁺		4,09±0,07	23,8±3,21	0,38±0,04
SB	mmolc kg ⁻¹	424±37,5	717±47,3	12,4±0,73
H ⁺ +Al ³⁺		7,07±0,70	17,8±7,21	48,5±2,73
Al ³⁺		2,27±0,83	5,87±2,53	9,27±0,95
CTCe		426±38,3	723±49,7	21,6±0,23
CTCt		433±37,8	741±43,2	70,2±2,50
V		97,8±0,12	96,8±0,80	17,6±0,60
m	%	0,53±0,15	0,80±0,30	42,8±3,95
Saturação por sódio		1,36±0,17	13,6±0,91	3,64±0,14
P biodisponível		13,8±1,06	187±25,9	3,71±0,83
S biodisponível		2038±87,0	6382±419	23,7±1,46
Fe biodisponível	mg kg ⁻¹	238±3,90	823±28,4	333±4,03
Cu biodisponível		2,71±0,12	3,68±1,01	1,24±0,04
Mn biodisponível		56,6±0,77	266±28,2	15,2±0,33
Zn biodisponível		11,3±0,54	95,9±4,27	1,66±0,09

COT: carbono orgânico total; Ca²⁺: cálcio trocável; Mg²⁺: magnésio trocável; Na⁺: sódio trocável; K⁺: potássio trocável; SB: soma de bases trocáveis; H⁺+Al³⁺: acidez potencial; Al³⁺: alumínio trocável; CTCe: Capacidade de troca de cátions efetiva; CTCt: Capacidade de troca de cátions total; V: porcentagem de saturação por bases; m: porcentagem de saturação por alumínio; P: fósforo; S: enxofre; Fe: ferro; Cu: cobre; Mn: manganês e Zn: zinco.

2.2.6 Análises das plantas

As plantas foram colhidas e separadas em folhas, caule+galhos e raízes. Posteriormente, foram embaladas em sacos de papel etiquetados e colocadas para secar em estufa com circulação forçada de ar a temperatura de 60°C por 96 horas. Em seguida foram pesadas para determinação da biomassa seca das plantas. Feito isso, as amostras foram moídas em moinho tipo Willye equipado com peneira de 30 MESH (595 µm) posteriormente, foram maceradas em almofariz de ágata e passadas em peneira de 106 µm para determinação das concentrações totais de Ca, K, P, S, Fe, Mn e Zn por espectroscopia de fluorescência de raios X por dispersão de energia (EDXRF) modelo EDX 720 da Shimadzu, análise sob vácuo, tubo de raios X de ródio (Rh), detector Si (Li) e tempo de análise de 200s. Esta técnica tem como vantagens a boa sensibilidade e a não destruição das amostras (dos Anjos et al., 2000), uma vez que podem ser diretamente analisadas por EDXRF logo após a secagem e moagem do material.

2.2.7 Análises estatísticas

Todos os dados obtidos foram tratados estatisticamente utilizando o programa SPSS versão 20.0 para Windows. Foram realizadas análises de variância (ANOVA) e teste de homogeneidade de variância de Levene ($p < 0,05$). Em caso de homogeneidade foi realizado o teste post hoc de diferença menos significativa (LSD). Caso contrário, o teste T3 de Dunnett era realizado.

As relações entre as diferentes variáveis foram determinadas pela análise discriminante fatorial após rotação ortogonal Varimax com normalização de Kaiser para que as variáveis carregadas formem componentes que possibilitem a interpretação da estrutura dos dados. Foram realizadas duas análises discriminantes: uma englobando os atributos químicos do Solo e Tecossolos (pH água; COT; CaCO₃; CTct, alumínio trocável, P, Cu, Fe, Mn e Zn biodisponíveis) e as medidas referentes ao crescimento das plantas (altura, DAS, e biomassa seca total); e a outra englobou as medidas referentes ao crescimento das plantas e as concentrações de macronutrientes (Ca, K, P e S) e micronutrientes (Fe, Mn e Zn) na biomassa total das plantas. As análises discriminantes foram realizadas com o software computacional XLSTAT.

2.3 RESULTADOS

2.3.1 Crescimento das plantas

Após quatro meses de experimento em casa de vegetação, as plantas de mutambo nos Tecnosolos apresentaram alturas ($78,1 \pm 9,36$ cm) superiores àquelas no solo controle ($47,2 \pm 2,15$ cm) ($p < 0,05$). As plantas de mutambo cresceram em média 31 cm mais nos tratamentos com Tecnosolos do que nos com solo natural. No entanto, não houve diferença significativa ($p > 0,05$) nas alturas das plantas de pau-jacaré entre todos os tratamentos (Figura 2).

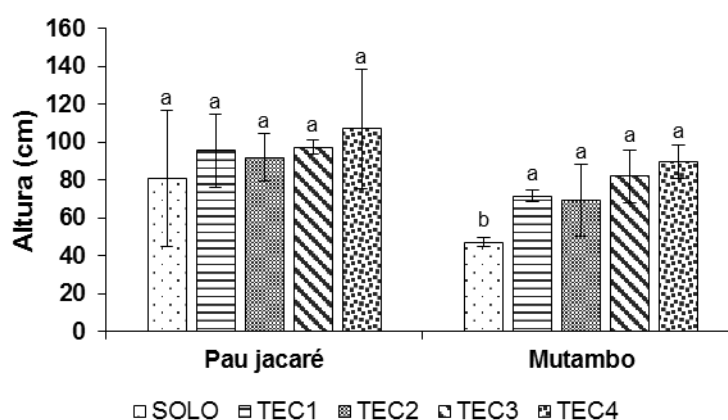


Figura 2. Altura final (cm) das plantas de pau-jacaré (*Piptadenia gonoacantha* (Mart.) J. F. Macbr.) e mutambo (*Guazuma ulmifolia* Lam.) cultivadas em SOLO (Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico); TEC1 (100% resíduos da construção civil - RCC); TEC2 (100% RCC + biofertilizante líquido comercial - BL); TEC3 (60% RCC + 40% composto orgânico comercial - CO) e TEC4 (60% RCC + 40% CO + BL). Letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre tratamentos para cada espécie arbórea.

Em relação ao diâmetro do caule ao nível do solo (DAS), não houve diferença significativa ($p > 0,05$) entre todos os tratamentos tanto para as plantas de pau-jacaré quanto para as de mutambo (Figura 3).

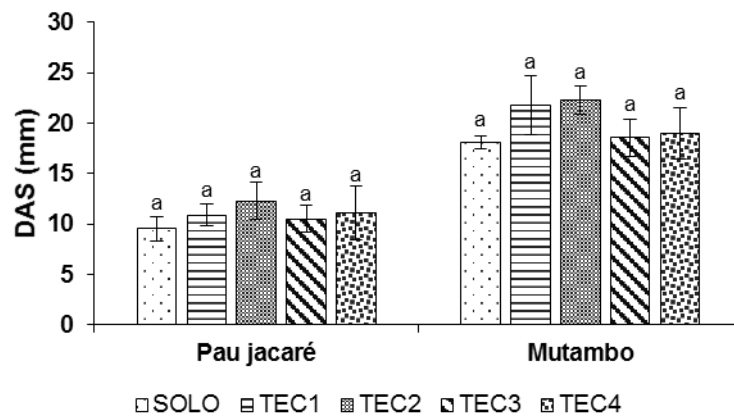


Figura 3. Diâmetro do caule ao nível do solo (DAS) final (mm) das plantas de pau-jacaré (*Piptadenia gonoacantha* (Mart.) J. F. Macbr.) e mutambo (*Guazuma ulmifolia* Lam.) cultivadas em SOLO (Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico); TEC1 (100% resíduos da construção civil - RCC); TEC2 (100% RCC + biofertilizante líquido comercial - BL); TEC3 (60% RCC + 40% composto orgânico comercial - CO) e TEC4 (60% RCC + 40% CO + BL). Letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre tratamentos para cada espécie arbórea.

A biomassa de folhas, caules e galhos e de raízes das plantas de pau-jacaré não apresentaram diferenças significativas entre tratamentos ($p > 0,05$). Além disso, o maior acúmulo de biomassa de pau-jacaré no Solo e no Tecossolo 2 foi nos caules e galhos (45% e 39%, respectivamente). No Tecossolo 1, a maior proporção de biomassa foi encontrada nas raízes (36%) e nos Tecossolos 3 e 4 nas folhas (41% e 40%, respectivamente). Em todos os tratamentos, a maior parte da biomassa total (64-72%) do pau-jacaré foi alocada na parte aérea (Figura 4A).

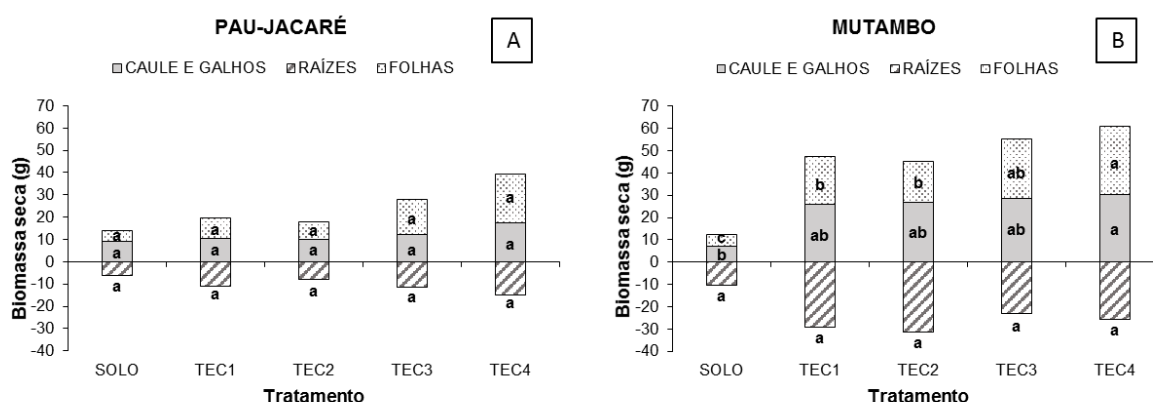


Figura 4. Biomassa seca final (g) das diferentes partes das plantas de (A) pau-jacaré (*Piptadenia gonoacantha* (Mart.) J. F. Macbr.) e (B) mutambo (*Guazuma ulmifolia* Lam.) cultivadas em SOLO (Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico); TEC1 (100% resíduos da construção civil - RCC);

TEC2 (100% RCC + biofertilizante líquido comercial - BL); TEC3 (60% RCC + 40% composto orgânico comercial - CO) e TEC4 (60% RCC + 40% CO + BL), após um período de 120 dias. Letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre tratamentos para cada parte da planta de ambas as espécies arbóreas.

A biomassa de folhas das plantas de mutambo foi superior ($24,3 \pm 5,46$ g) ($p < 0,05$) em todos os tratamentos quando comparados com o Solo ($4,93 \pm 1,08$ g). Já, a biomassa de caule e galhos foi superior a do Solo apenas no Tecnosolo 4 ($p < 0,05$). Em relação a biomassa de raízes, não houve diferença significativa entre os tratamentos ($p > 0,05$) (Figura 4B). A maior proporção da biomassa das plantas de mutambo foi alocada nas raízes daquelas cultivadas no Solo (46%), Tecnosolo 1 (38%) e Tecnosolo 2 (41%). As plantas que cresceram no Tecnosolo 3 alocaram a maior proporção da biomassa nos caules e galhos, enquanto que as plantas do Tecnosolo 4 alocaram a mesma proporção nas folhas, caule e galhos (35%). Em todos os tratamentos, a maior parte da biomassa total do mutambo (54-70%) foi alocada na parte aérea (Figura 4B).

Tratando-se da biomassa total das plantas de pau-jacaré, não houve diferença significativa ($p > 0,05$) entre os tratamentos, enquanto a biomassa total de mutambo foi superior ($p < 0,05$) em todos os Tecnosolos ($79,6 \pm 4,93$ g) quando em comparação com o solo natural ($22,5 \pm 8,95$ g) (Figuras 5).

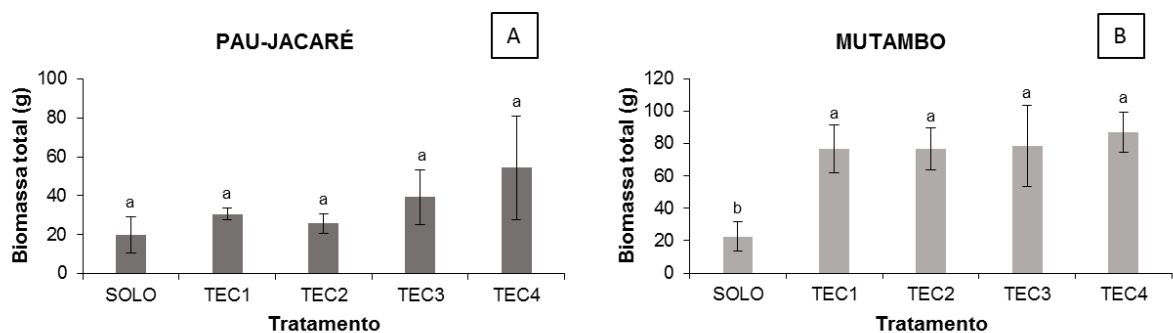


Figura 5. Biomassa seca total final (g) de (A) pau-jacaré (*Piptadenia gonoacantha* (Mart.) J. F. Macbr.) e (B) mutambo (*Guazuma ulmifolia* Lam.) cultivadas em SOLO (Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico); TEC1 (100% resíduos da construção civil - RCC); TEC2 (100% RCC + biofertilizante líquido comercial - BL); TEC3 (60% RCC + 40% composto orgânico comercial - CO) e TEC4 (60% RCC + 40% CO + BL), após um período de 120 dias. Letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre tratamentos para cada espécie arbórea.



Figura 6. Plantas de pau-jacaré (*Piptadenia gonoacantha* (Mart.) J. F. Macbr.) cultivadas em SOLO (Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico - **A**); TEC1 (100% resíduos da construção civil – RCC - **B**); TEC2 (100% RCC + biofertilizante líquido comercial - BL - **C**); TEC3 (60% RCC + 40% composto orgânico comercial – CO - **D**) e TEC4 (60% RCC + 40% CO + BL - **E**), após 120 dias de experimento.

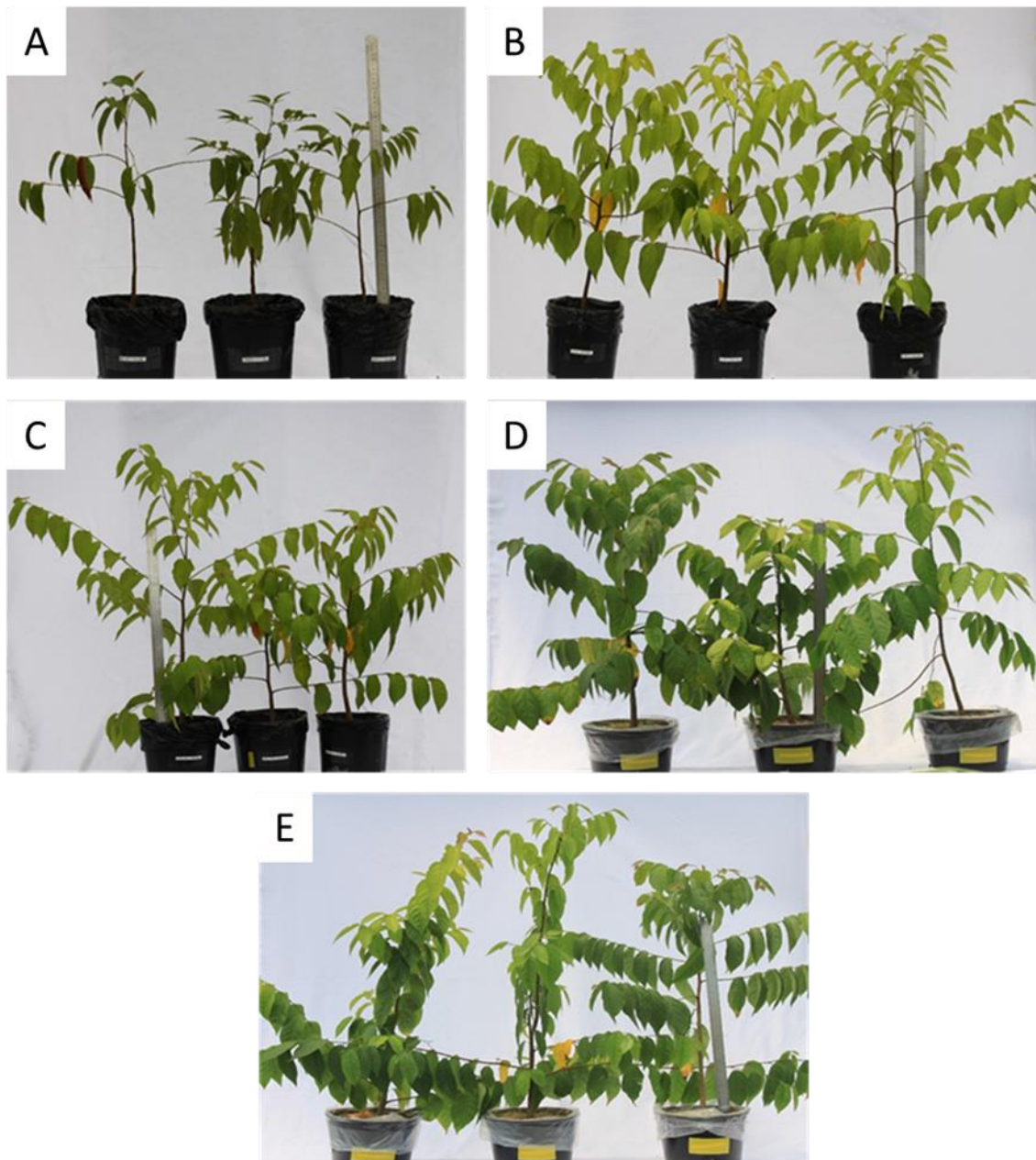


Figura 7. Plantas de mutambo (*Guazuma ulmifolia* Lam.) cultivadas em SOLO (Latosolo Vermelho-Amarelo distrófico típico - **A**); TEC1 (100% resíduos da construção civil – RCC - **B**); TEC2 (100% RCC + biofertilizante líquido comercial – BL - **C**); TEC3 (60% RCC + 40% composto orgânico comercial – CO - **D**) e TEC4 (60% RCC + 40% CO + BL - **E**), após 120 dias de experimento.

2.3.2 Atributos dos Tecnosolos e do Solo

Os valores de pH em água, equivalente de CaCO_3 , CTC total e as concentrações de fósforo (P), enxofre (S), cobre (Cu), manganês (Mn) e zinco (Zn) biodisponíveis foram significativamente maiores ($p < 0,05$) em todos os Tecnosolos comparados com o Solo (para ambas as espécies arbóreas; Tabelas 2 e 3). Já os teores de carbono orgânico total (COT) e as concentrações de ferro (Fe) foram mais

elevados ($p < 0,05$) apenas nos Tecno solos 3 e 4, enquanto que nos Tecno solos 1 e 2 foram iguais ou inferiores às do Solo (Tabelas 2 e 3).

Tabela 2. Atributos do SOLO (Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico); TEC1 (100% resíduos da construção civil - RCC); TEC2 (100% RCC + biofertilizante líquido comercial - BL); TEC3 (60% RCC + 40% composto orgânico comercial - CO) e TEC4 (60% RCC + 40% CO + BL) com a espécie arbórea pau-jacaré (A), após fim do experimento (120 dias). Letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre tratamentos para cada atributo químico.

Atributos químicos	Unidade	Tratamento				
		SOLO A	TEC1A	TEC2A	TEC3A	TEC4A
pH água		5,57±0,23c	7,67±0,12ab	7,83±0,10a	7,32±0,10b	7,47±0,05ab
pH KCl		4,25±0,05b	7,53±0,09a	7,55±0,23a	7,24±0,15a	7,26±0,03a
Equivalente de CaCO ₃	g kg ⁻¹	60,6±10,9c	135±1,91b	130±2,67b	161±2,44a	162±5,46a
COT		3,79±0,99b	3,90±0,64b	4,41±1,08b	37,9±3,76a	40,0±2,13a
Ca ²⁺		4,21±0,63c	205±0,55b	200±16,5b	402±23,8a	388±26,0a
Mg ²⁺		3,47±0,19b	5,88±1,36b	3,92±1,38b	49,5±3,77a	44,0±9,24a
Na ⁺		3,58±0,52b	6,79±0,35b	4,39±0,35b	46,1±7,73a	40,0±15,1a
K ⁺		0,49±0,09c	3,82±0,41b	2,91±0,13b	9,48±0,67a	8,50±1,31a
SB	mmolc kg ⁻¹	11,7±0,46c	221±1,40b	212±16,3b	507±31,0a	481±17,0a
H ⁺ +Al ³⁺		47,7±1,86a	8,07±0,99c	11,1±0,61c	17,5±9,26b	20,8±2,31b
Al ³⁺		7,73±1,10a	1,10±0,10b	0,33±0,12b	3,33±0,90b	5,10±1,30ab
CTCe		19,5±1,02c	223±1,30b	212±16,4b	510±30,7a	486±16,9a
CTCt		67,1±1,36c	231±2,28b	223±16,7b	528±30,1a	507±14,7a
V		17,5±0,36b	96,0±0,35a	94,8±0,27a	96,1±1,98a	94,9±0,61a
m	%	39,6±3,90a	0,49±0,05b	0,16±0,05c	0,66±0,20bc	1,05±0,28bc
Saturação por sódio		5,32±0,67ab	2,94±0,18b	1,97±0,06b	8,73±1,37a	7,89±3,00a
P biodisponível		3,84±1,39c	17,3±2,41b	16,4±2,01b	194±13,5a	172±10,4a
S biodisponível		17,8±1,10c	1120±90,9b	1028±68,3b	3941±64a	3835±118a
Fe biodisponível	mg kg ⁻¹	319±11,7b	237±3,51c	242±6,80c	732±43,1a	730±64,7a
Cu biodisponível		1,43±0,08c	2,93±0,08b	3,03±0,48b	6,41±0,62a	6,52±0,57a
Mn biodisponível		15,5±0,56c	53,4±1,04b	54,0±1,47b	192±11,0a	196±19,4a
Zn biodisponível		1,56±0,86c	11,1±0,29b	12,1±1,96b	84,3±1,08a	87,5±3,38a
Textura		Franco Argilo Arenosa	Franco Arenosa	Franco Arenosa	Franca	Franco Argilosa
Areia		61,6	69,2	70,2	49,0	39,7
Silte	%	5,47	15,3	14,3	29,4	29,8
Argila		33,0	15,6	15,5	21,6	30,5

COT: carbono orgânico total; Ca²⁺: cálcio trocável; Mg²⁺: magnésio trocável; Na⁺: sódio trocável; K⁺: potássio trocável; SB: soma de bases trocáveis; H⁺+Al³⁺: acidez potencial; Al³⁺: alumínio trocável; CTCe: Capacidade de troca de cátions efetiva; CTCt: Capacidade de troca de cátions total; V: percentagem de saturação por bases; m: percentagem de saturação por alumínio; P: fósforo; S: enxofre; Fe: ferro; Cu: cobre; Mn: manganês e Zn: zinco.

Tabela 3. Atributos do SOLO (Latosolo Vermelho-Amarelo distrófico típico); TEC1 (100% resíduos da construção civil - RCC); TEC2 (100% RCC + biofertilizante líquido comercial - BL); TEC3 (60% RCC + 40% composto orgânico comercial – CO) e TEC4 (60% RCC + 40% CO + BL) com a espécie arbórea mutambo (B), após fim do experimento (120 dias). Letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre tratamentos para cada atributo químico.

Atributos químicos	Unidade	Tratamento				
		SOLO B	TEC1B	TEC2B	TEC3B	TEC4B
pH água		5,29±0,07b	7,82±0,19 ^a	7,66±0,06a	7,46±0,02a	7,44±0,04a
pH KCl		4,23±0,03c	7,65±0,25 ^a	7,81±0,12a	7,15±0,12b	7,28±0,06b
Equivalente de CaCO ₃	g kg ⁻¹	56,5±5,20c	138±5,58b	136±0,69b	161±4,29a	164±1,95a
COT		4,10±0,47b	5,02±0,18b	5,02±0,47b	43,7±2,22a	42,4±4,80a
Ca ²⁺		3,29±0,55c	274±35,5b	254±6,43b	440±7,49a	425±23,3a
Mg ²⁺		3,02±0,38c	13,0±1,38b	13,9±2,28b	55,8±2,28a	52,5±3,26a
Na ⁺		3,30±0,40b	7,80±0,07b	5,81±0,15b	63,8±5,66a	60,9±5,43a
K ⁺		0,40±0,01c	3,87±0,47b	2,81±0,24b	8,32±1,29a	7,23±0,65a
SB	mmolc kg ⁻¹	10,0±0,40c	299±36,0b	277±8,17b	568±13,6a	546±32,3a
H ⁺ +Al ³⁺		48,1±0,81a	8,00±1,25d	8,67±2,89d	16,2±0,53c	20,3±0,31b
Al ³⁺		8,40±1,74a	0,60±0,35c	3,40±0,80b	2,53±1,60bc	4,13±1,17b
CTCe		18,4±1,49c	300±35,7b	280±8,22b	571±13,9a	550±33,4a
CTCt		66,5±2,27c	308±36,9b	289±9,58b	587±13,6a	570±33,2a
V		15,1±0,96b	97,2±0,13 ^a	95,8±0,66a	96,8±0,35a	95,7±0,11a
m	%	45,3±6,18a	0,21±0,15b	1,21±0,28b	0,44±0,28b	0,75±0,18b
Saturação por sódio		4,97±0,65b	2,56±0,31c	2,01±0,04c	10,9±0,71a	10,7±0,34a
P biodisponível		2,64±0,40c	13,6±2,66b	12,6±1,20b	187±15,8a	161±15,0a
S biodisponível		17,0±0,52c	1403±11,6b	1325±48,3b	4188±315a	4303±179a
Fe biodisponível	mg kg ⁻¹	293±22,8b	235±3,68b	235±3,34b	721±31,4a	750±25,4a
Cu biodisponível		1,32±0,05c	2,76±0,19b	2,79±0,02b	6,35±0,54a	5,93±0,36a
Mn biodisponível		13,9±1,32c	53,2±0,52b	51,5±1,30b	190±6,42a	204±9,65a
Zn biodisponível		0,82±0,13c	11,7±0,28b	14,2±1,60b	86,5±2,06a	85,2±1,77a
Textura		Franco Argilo Arenosa	Franco Arenosa	Franco Arenosa	Franca	Franco Argilosa
Areia		66,2	69,0	69,8	43,2	38,2
Silte	%	1,94	15,4	11,6	30,6	31,0
Argila		31,9	15,6	18,6	26,1	30,8

COT: carbono orgânico total; Ca²⁺: cálcio trocável; Mg²⁺: magnésio trocável; Na⁺: sódio trocável; K⁺: potássio trocável; SB: soma de bases trocáveis; H⁺+Al³⁺: acidez potencial; Al³⁺: alumínio trocável; CTCe: Capacidade de troca de cátions efetiva; CTCt: Capacidade de troca de cátions total; V: percentagem de saturação por bases; m: percentagem de saturação por alumínio; P: fósforo; S: enxofre; Fe: ferro; Cu: cobre; Mn: manganês e Zn: zinco.

2.3.3 Nutrientes nas plantas

Na parte aérea das plantas de pau-jacaré e mutambo, as concentrações de cálcio (Ca), potássio (K), fósforo (P) e enxofre (S) foram significativamente superiores ($p < 0,05$) em todos os Tecossolos quando comparadas as do Solo (Tabela 4). Por

outro lado, os teores de Mn e Zn nestas espécies quando cresceram no Solo, foram iguais ou superiores aos Tecnosolos.

Os teores de Fe na parte aérea do pau-jacaré foram mais elevados no Solo do que nos Tecnosolos (Tabela 4). Enquanto que este mesmo nutriente na parte aérea das plantas de mutambo apresentou concentrações maiores nos Tecnosolos 1, 2 e 4 quando comparados com o Solo.

Tabela 4. Concentrações de macro (g kg^{-1}) e micronutrientes (mg kg^{-1}) na parte aérea das espécies estudadas nos seguintes tratamentos: SOLO (Latosolo Vermelho-Amarelo distrófico típico); TEC1 (100% resíduos da construção civil - RCC); TEC2 (100% RCC + biofertilizante líquido comercial - BL); TEC3 (60% RCC + 40% composto orgânico comercial - CO) e TEC4 (60% RCC + 40% CO + BL), após fim do experimento (120 dias). Letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre tratamentos para cada concentração de nutriente na parte aérea das espécies arbóreas.

PAU-JACARÉ						
	SOLO	TEC1	TEC2	TEC3	TEC4	Valor referência
Ca	4,10±0,51b	14,3±1,81a	14,1±1,07a	13,6±0,31 ^a	12,6±1,84a	8,40 - 13,0 ^(1;2)
K g kg^{-1}	3,93±0,64c	7,78±0,62b	8,47±1,28b	12,3±0,46 ^a	13,3±1,82a	8,80 - 19,0 ^(1;2)
P	0,44±0,03d	1,63±0,16c	2,06±0,25bc	4,46±0,39 ^a	2,56±0,70b	0,70 - 4,00 ^(1;2)
S	0,90±0,16c	5,09±0,82ab	4,86±1,19ab	5,47±0,34 ^a	3,89±0,36b	1,00 ⁽²⁾
Fe	126±16,7a	90,8±19,6b	75,3±6,68bc	66,4±6,31c	71,1±0,85bc	276 ⁽²⁾
Mn mg kg^{-1}	129±13,3a	54,6±7,58b	54,8±6,25b	76,4±2,97ab	62,6±38,6ab	126 ⁽²⁾
Zn	36,6±8,83a	19,3±2,49a	20,9±2,45a	17,3±2,80 ^a	18,6±7,09a	19,0 ⁽²⁾
MUTAMBO						
	SOLO	TEC1	TEC2	TEC3	TEC4	Valor referência
Ca	4,38±0,10b	9,38±0,99a	8,96±0,66a	9,70±2,91a	11,5±1,42a	8,40 - 13,0 ^(1;2)
K g kg^{-1}	3,01±0,57b	8,13±0,99a	9,03±0,51a	14,3±1,83a	12,0±1,10a	8,80 - 19,0 ^(1;2)
P	0,38±0,02c	0,99±0,08b	0,93±0,10b	2,21±0,26a	1,92±0,24a	0,70 - 4,00 ^(1;2)
S	0,77±0,04b	2,06±0,22a	1,87±0,18a	2,05±0,09a	2,30±0,22a	1,00 ⁽²⁾
Fe	64,3±3,94b	79,5±1,82a	74,8±0,54a	66,4±5,41b	74,4±5,52a	276 ⁽²⁾
Mn mg kg^{-1}	135±19,5ab	66,3±1,54d	74,3±4,84cd	117±37,8bc	163±30,9a	126 ⁽²⁾
Zn	60,3±19,6a	44,2±1,84ab	25,0±1,83c	44,8±6,68ab	33,2±1,64bc	19,0 ⁽²⁾

Fonte: (1) adaptado de Gonçalves et al. (1992a); (2) adaptado de Braga et al. (1995).

Os teores de Zn nas plantas de mutambo foram maiores do que nas de pau-jacaré em todos os tratamentos, enquanto que os de Ca, P e S foram sempre superiores nas plantas de mutambo (Tabelas 5 e 6). Embora as duas espécies nos Tecnosolos 3 e 4 apresentaram altas concentrações de K em relação aos outros tratamentos, o mutambo no Tecnosolo 3 obteve a maior concentração deste nutriente (Tabela 6). As plantas de mutambo cultivadas nos Tecnosolos 3 e 4 apresentaram os maiores teores de Mn comparado tanto com os outros tratamentos

quanto com as plantas de pau-jacaré do mesmo tratamento (Tabelas 5 e 6). Ambas as espécies de todos os Tecnosolos apresentam teores maiores de Fe que as do Solo, porém, o mutambo do Tecnosolo 4 apresenta a maior concentração deste nutriente.

Tabela 5. Concentrações de elementos químicos na biomassa total das plantas de pau-jacaré nos tratamentos: SOLO (Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico); TEC1 (100% resíduos da construção civil - RCC); TEC2 (100% RCC + biofertilizante líquido comercial - BL); TEC3 (60% RCC + 40% composto orgânico comercial - CO) e TEC4 (60% RCC + 40% CO + BL), após fim do experimento (120 dias). Letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre tratamentos para cada concentração de nutriente na biomassa total do pau-jacaré.

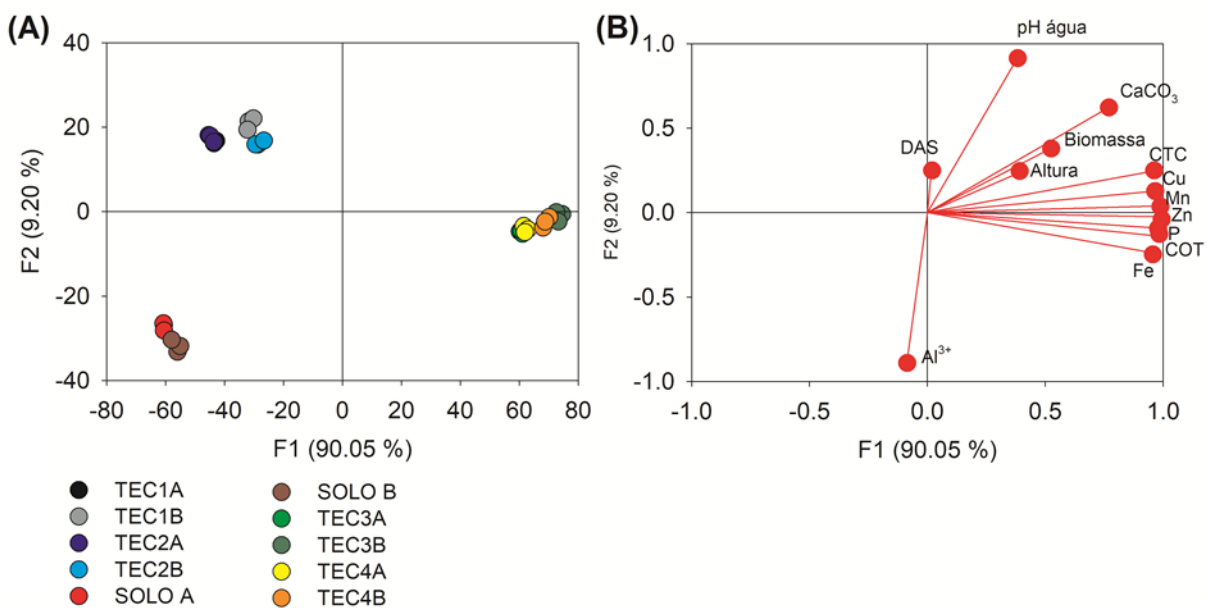
PAU-JACARÉ					
mg kg ⁻¹					
	SOLO	TEC1	TEC2	TEC3	TEC4
Ca	3821±375b	12731±1114a	14098±1226a	13185±578a	13903±1688a
K	3743±497b	6542±1159ab	7030±905ab	10014±759a	10827±2153a
P	426±40,8c	1689±137b	2067±144b	4158±180a	2295±186b
S	1025±149b	5163±602a	5603±611a	6298±423a	4802±634a
Fe	742±84,3b	1302±515ab	1238±53,8ab	1530±211ab	2031±1345a
Mn	107±8,43ab	69,2±8,22b	71,5±7,75b	146±35,5a	140±84,4a
Zn	33,6±6,84a	22,5±1,36a	24,3±1,39a	36,8±7,67a	36,4±5,13a

Tabela 6. Concentrações de elementos químicos na biomassa total das plantas de mutambo nos tratamentos: SOLO (Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico); TEC1 (100% resíduos da construção civil - RCC); TEC2 (100% RCC + biofertilizante líquido comercial - BL); TEC3 (60% RCC + 40% composto orgânico comercial - CO) e TEC4 (60% RCC + 40% CO + BL), após fim do experimento (120 dias). Letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre tratamentos para cada concentração de nutriente na biomassa total do mutambo.

MUTAMBO					
mg kg ⁻¹					
	SOLO	TEC1	TEC2	TEC3	TEC4
Ca	3684±367c	9547±588b	8399±377b	9758±1810b	13294±1622a
K	2856±357c	7510±933b	7464±999b	12718±1368a	10675±1263ab
P	225±86,4c	949±46,9b	848±88,0b	2079±195a	2091±158a
S	751±36,0d	2616±158b	2155±17,1c	2581±45,2b	2974±306a
Fe	668±359b	1530±1082b	859±83,6b	1497±561b	3443±1274a
Mn	107±1,29c	78,9±9,37c	70,0±9,13c	163±27,9b	247±49,9a
Zn	57,4±8,56a	38,5±3,34b	25,8±2,20b	54,8±12,4a	58,3±9,95a

2.3.4 Análises discriminantes

A análise discriminante foi realizada a partir dos atributos químicos (pH água; COT; CaCO₃; CTCt, alumínio trocável, P, Cu, Fe, Mn e Zn biodisponíveis de todos os Tecnosolos e do Solo, além das medidas referentes ao crescimento das plantas (altura, DAS e biomassa seca total) (Figura 8). Esses atributos foram escolhidos devido a sua importância para avaliar o desenvolvimento das plantas.



COT: carbono orgânico total; CaCO₃: equivalente de carbonato de cálcio; CTCt: Capacidade de troca de cátions total; Al³⁺: alumínio trocável; P: fósforo; Cu: cobre; Fe: ferro; Mn: manganês; Zn: zinco; DAS: diâmetro na altura do solo e Biomassa: biomassa seca total.

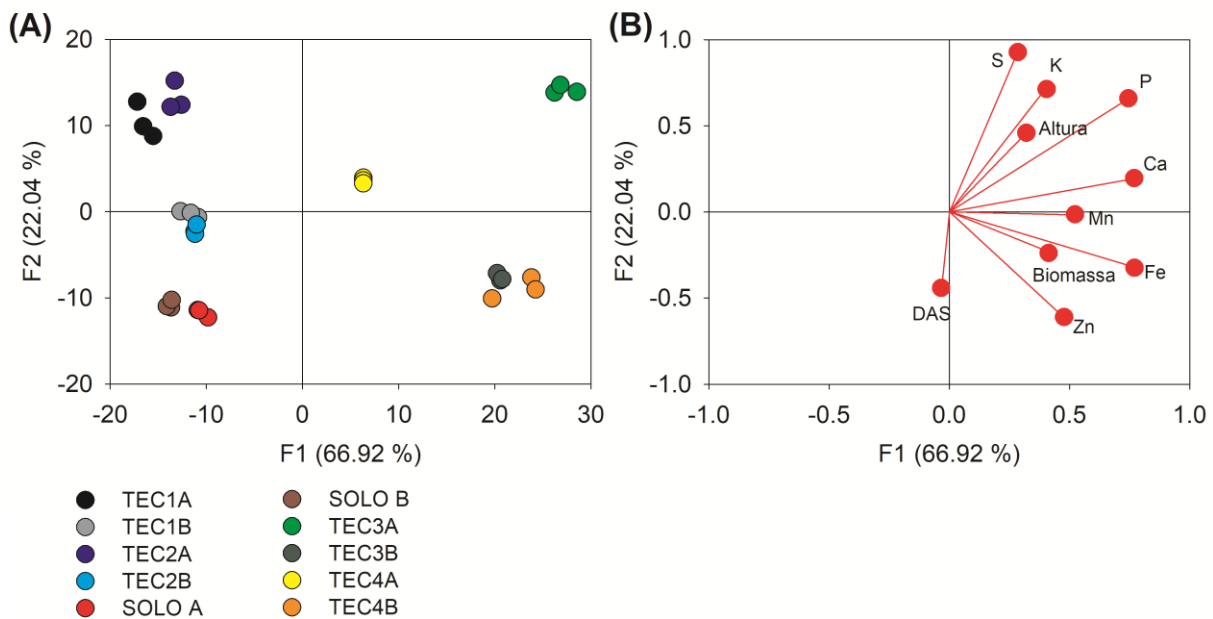
Figura 8. Distribuição dos tratamentos de acordo com os dois fatores principais obtidos na análise discriminante (F1 e F2) (A); e distribuição dos atributos químicos pH água, COT, CaCO₃, CTCt, Al³⁺, P, Cu, Fe, Mn e Zn biodisponíveis no solo e das variáveis de crescimento das plantas (Altura, DAS e Biomassa) de acordo com F1 e F2 (B). Os tratamentos são: SOLO (Latosolo Vermelho-Amarelo distrófico típico); TEC1 (100% resíduos da construção civil - RCC); TEC2 (100% RCC + biofertilizante líquido comercial - BL); TEC3 (60% RCC + 40% composto orgânico comercial - CO) e TEC4 (60% RCC + 40% CO + BL) com as espécies arbóreas pau-jacaré (A) e mutambo (B).

A análise discriminante (Figura 8) indica que os Tecnosolos elaborados apenas com RCC (1 e 2) diferem dos elaborados com RCC e composto orgânico (3 e 4) e do solo controle. De fato, os resultados mostraram que os atributos químicos como CTCt, COT, CaCO₃, P, micronutrientes (Cu, Fe, Mn e Zn) e as alturas e

biomassa total das plantas são maiores nos Tecno solos 3 e 4 (Tabelas 2 e 3; Figuras 2 e 5). O primeiro componente principal (F1) extraído na análise discriminante (90,05%) evidencia que todas estas variáveis estão correlacionadas com o composto orgânico presente nos Tecno solos 3 e 4. O pH tem comportamento inverso ao teor de alumínio trocável, que é mais elevado no Solo quando comparado aos Tecno solos estudados. Os valores de DAS, por outro lado, são todos menores no Solo. Além disso, esta análise discriminante mostra que não há diferenças nos atributos químicos entre as diferentes espécies arbóreas.

Uma segunda análise discriminante englobando as medidas referentes ao crescimento das plantas (altura, DAS e biomassa seca total) e as concentrações de macronutrientes (Ca, K, P e S) e micronutrientes (Fe, Mn e Zn) na biomassa total das plantas é apresentada na Figura 9. A análise evidencia uma nítida separação das espécies arbóreas em todos os Tecno solos. As plantas de pau-jacaré apresentaram as maiores alturas nos tratamentos com Tecno solos comparadas com as plantas de mutambo nestes tratamentos. Por outro lado, as plantas de mutambo detêm os maiores valores de DAS, inclusive no Solo, que as plantas de pau-jacaré (Figuras 2 e 3). Além disso, a biomassa seca total das plantas de mutambo também são maiores em todos os tratamentos quando comparadas com as das plantas de pau-jacaré (Figura 5).

A separação das espécies nesta análise discriminante também foi devido as diferentes concentrações de nutrientes nas biomassas totais das duas espécies arbóreas (Tabelas 5 e 6).



Ca: cálcio; K: potássio; P: fósforo; S: enxofre; Fe: ferro; Mn: manganês; Zn: zinco; DAS: diâmetro na altura do solo e Biomassa: biomassa seca total.

Figura 9. Distribuição dos tratamentos de acordo com os dois fatores principais obtidos na análise discriminante (F1 e F2) **(A)**; e distribuição dos macronutrientes (Ca, K, P e S) e micronutrientes (Fe, Mn e Zn) na biomassa seca total das plantas e das variáveis de crescimento (Altura, DAS e Biomassa) de acordo com F1 e F2 **(B)**. Os tratamentos são: SOLO (Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico); TEC1 (100% resíduos da construção civil - RCC); TEC2 (100% RCC + biofertilizante líquido comercial - BL); TEC3 (60% RCC + 40% composto orgânico comercial - CO) e TEC4 (60% RCC + 40% CO + BL) com as espécies arbóreas pau-jacaré (A) e mutambo (B).

2.4 DISCUSSÃO

Os Tecnosolos elaborados apenas com resíduos da construção civil (RCC) permitiram às mudas de pau-jacaré uma produção total de biomassa similar às do Latossolo (tratamento Solo), e inclusive uma produção superior para as mudas de mutambo (Figura 5). Quando os RCC foram misturados com composto orgânico, a produção de biomassa das duas espécies arbóreas foi significativamente maior do que as do Solo. Em todos os casos, os Tecnosolos favoreceram um aumento de biomassa tanto da parte aérea como nas raízes.

A maior produção de biomassa nas duas espécies estudadas no Tecnosolo elaborado com RCC e composto orgânico pode estar relacionada à um maior fornecimento de macronutrientes (Ca, Mg, K, P e S) e diversos micronutrientes (Fe, Cu, Mn e Zn) às plantas devido principalmente a presença do composto orgânico.

Esta afirmação é corroborada pelas análises químicas que evidenciam maiores concentrações desses elementos, além de carbono orgânico total (COT) nos Tecnosolos (Tabelas 2 e 3). Estes nutrientes disponíveis são essenciais para o desenvolvimento das plantas. O cálcio, por exemplo, possui papel estrutural, além de regular o metabolismo vegetal, enquanto que o potássio é indispensável nos processos fisiológicos das plantas (Malavolta, 1980; Kerbauy, 2004; Andrade, 2010). Nestes Tecnosolos, como mencionado anteriormente, há elevados valores de fósforo biodisponível quando comparados com o solo natural. Esta forma de fósforo inorgânico é proveniente de processos biológicos no solo que mineralizam as formas orgânicas de fósforo contidas no composto orgânico. Estes processos ocorrem pela ação de microorganismos no solo, sendo um fator importante na disponibilização desse nutriente às plantas (Rossi, 2013).

O composto orgânico presente nos Tecnosolos também proporcionou elevados valores de CTC total e CTC efetiva quando comparados com os do solo controle (Tabelas 2 e 3). Uma vez que, a maior parte da CTC está ocupada por cátions essenciais como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , como nestes Tecnosolos, pode-se dizer que esse é um solo bom para a nutrição das plantas (Roquim, 2010). Além disso, as mudas das duas espécies que cresceram nestes Tecnosolos apresentaram maiores concentrações de Ca, K, P, S e Mn do que as plantas que cresceram no Solo (Tabelas 5 e 6).

Os Tecnosolos elaborados apenas com RCC também obtiveram valores de CTC total e CTC efetiva maiores que os do solo natural (Tabelas 2 e 3). Este fato pode ser explicado devido a presença de minerais de argila 2:1 nos RCC, enquanto o Latossolo possui uma mineralogia predominantemente caulínica (minerais de argila 1:1) (SiBCS, EMBRAPA, 2018). Esta afirmação é corroborada pelos resultados da atividade de argila dos Tecnosolos e do solo natural. A atividade da fração argila é uma estimativa da CTC da fração argila do solo e seu cálculo considera os valores de CTC total e a porcentagem de argila de cada solo (Tabelas 2 e 3). Os Tecnosolos apenas com RCC apresentaram atividades de argila variando entre 143 a 197 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de argila, enquanto que no Solo, os valores ficaram entre 20 a 21 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de argila. Valores maiores ou iguais a 27 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ indicam a presença de argilas de atividade alta (minerais 2:1) e valores inferiores a 27 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ indicam a presença de argilas de atividade baixa (minerais 1:1)

(SiBCS, EMBRAPA, 2018). No entanto, mais estudos acerca da mineralogia dos RCC devem ser realizados.

Estes Tecossolos apenas com RCC também apresentaram maiores concentrações de macronutrientes (Ca, Mg, K, P e S) e diversos micronutrientes (Cu, Mn e Zn) que o Solo, o que proporcionou uma maior produção total de biomassa pelas mudas de mutambo (Tabela 3). Além disso, nestes Tecossolos as plantas de mutambo tiveram maiores concentrações de Ca, K, P e S em suas biomassas que as do Solo (Tabela 6). Embora as duas espécies arbóreas cresceram no mesmo Tecossolo, com as mesmas condições físico-químicas iniciais, as mudas de pau-jacaré apresentaram a mesma produção total de biomassa que as do Solo (Figura 5), indicando que há alguma característica intrínseca desta espécie ao meio, além da fertilidade do solo. Estas mudas também apresentaram concentrações maiores de Ca, P e S quando comparados com as que cresceram no Solo (Tabela 5).

A Tabela 4 contém valores de referência encontrados na literatura para as concentrações de cada um dos nutrientes estudados na parte aérea das plantas. Gonçalves et al. (1992) e Braga et al. (1995) trabalharam com diferentes mudas de espécies arbóreas nativas em casa de vegetação utilizando como substrato solos naturais, similares ao solo controle do presente estudo. No entanto, os resultados referentes às concentrações de nutrientes nas biomassas das plantas por esses autores foram diferentes das encontradas nas mudas de pau-jacaré e mutambo no presente trabalho, embora também se tratavam de espécies pioneiras nativas.

É válido ressaltar que, em razão das diferentes condições de ocorrência natural destas espécies pioneiras, como por exemplo, as diferentes condições edáficas que se desenvolvem, espera-se que suas exigências nutricionais sejam distintas, bem como o comportamento fisiológico de cada espécie, que irá influenciar diretamente o crescimento, a sobrevivência, abundância e a distribuição espacial e temporal das plantas no meio (Campoe et al., 2010; Campoe et al., 2014).

Há uma carência de informações na literatura acerca da autoecologia das espécies florestais nativas do Brasil. Desta forma, não existem estudos com mudas de mutambo e pau-jacaré em condições similares ao experimento para serem comparados com os resultados deste trabalho.

Os resultados de equivalente de CaCO_3 dos RCC são superiores ao Solo no início do experimento (Tabela 1), bem como em todos os Tecossolos com ambas

as espécies arbóreas comparativamente com o Solo no final do experimento (Tabelas 2 e 3). O mesmo padrão ocorre com os valores de pH. Estes atributos químicos estão atrelados à composição química dos RCC (cimentos e argamassas) como carbonatos, cal hidratada, hidróxido de cálcio, silicatos de cálcio, entres outros. (Lasso et al., 2013). Esta composição responde pelas altas concentrações de cálcio (e magnésio) destes resíduos bem como pelos elevados valores de pH (>7,0) nos Tecnosolos. A presença destes compostos, além de promoverem uma elevação dos valores de pH do solo, podem ter uma ação alcalinizante ao longo do tempo devido à presença de carbonato de cálcio precipitado, evidenciado pelos valores de equivalente de CaCO_3 ($\%E_{\text{CaCO}_3}$) que variaram entre 13 a 16,4% nos Tecnosolos. As elevadas concentrações de enxofre nos RCC (Tabela 1) provavelmente são provenientes da presença de gesso, embora as maiores quantidades são separadas na etapa de beneficiamento dos resíduos, ou da presença de gesso na composição de cimentos e outros materiais. Já, os altos teores de ferro podem ser atribuídos às grandes concentrações de óxidos de ferro em tijolos e materiais cerâmicos (Chandara et al., 2009; Ulsen et al., 2010; Machado, 2016).

O pH do solo é o principal fator que afeta a disponibilidade de nutrientes no solo para as plantas. Alguns elementos químicos como o alumínio por exemplo, tem sua disponibilidade no solo aumentada com o decréscimo do pH (Viani et al., 2014). Este fato é corroborado pelas análises químicas que evidenciam maiores teores de alumínio trocável (Al^{3+}) no solo natural comparado com os Tecnosolos (Tabelas 2 e 3). O alumínio na forma de íon trivalente (Al^{3+}) é considerado um elemento tóxico para as plantas, afetando seu desenvolvimento uma vez que causa anomalias e danos no sistema radicular (Beutler et al., 2001). No entanto, há uma ampla variação quanto ao grau de tolerância ao Al^{3+} nas diferentes espécies florestais (Presotto et al., 2018).

A saturação por alumínio (m%) dos tratamentos com solo controle foi de 39 a 45%, valores considerados segundo Osaki (1991) como prejudiciais à diversas culturas. Todos os Tecnosolos, por outro lado, apresentaram valores que variam de 0,16 a 1,21%, considerados não prejudiciais.

A aplicação do biofertilizante líquido não afetou significativamente os resultados de crescimento de plantas ou de sua composição nutricional ($p > 0,05$).

2.5 CONCLUSÕES

A problemática ambiental acerca dos grandes volumes gerados de resíduos da construção civil (RCC), bem como a destinação inadequada destes em todo o Brasil, requer a busca por soluções mais sustentáveis tanto a curto quanto longo prazo. Além disso, há um interesse crescente ao redor do mundo por metodologias facilmente aplicáveis e de baixo custo na recuperação de áreas degradadas. Desta forma, o presente estudo demonstra a possibilidade de se atrelar esses dois aspectos. Nossos dados evidenciam o potencial de Tecnosolos elaborados a partir de resíduos da construção civil em permitir o crescimento de espécies arbóreas nativas brasileiras em áreas onde houve perda total ou degradação severa de solos. Os resultados demonstram ainda que a adição de compostos orgânicos melhora significativamente o desempenho de Tecnosolos construídos no estabelecimento e desenvolvimento das plantas.

É válido ressaltar que o uso de Tecnosolos elaborados apenas com RCC pode ser uma alternativa viável na recuperação de áreas degradadas, uma vez que promoveram um crescimento adequado de plantas; com rendimento similar ou superior ao apresentado pelo solo natural em condições ambientais controladas (casa de vegetação). No entanto, testes em campo são primordiais para validar esse estudo, uma vez que o desempenho das plantas pode ser diferente em condições de campo (ambiente não controlado). Além disso, visto que a adição de compostos orgânicos nestes Tecnosolos permite um melhor desenvolvimento das plantas, é importante a realização de estudos acerca da quantidade mínima ideal de composto orgânico a ser adicionado para se obter uma melhora significativa no crescimento das plantas. Além disso, é necessário a realização de testes em campo para Nesse sentido, estudos futuros devem buscar avaliar a viabilidade, não somente técnica, mas econômica do uso de Tecnosolos na recuperação de áreas degradadas.

REFERÊNCIAS

- Almeida, S.P.; Proença, C.E.B.; Sano, S.M.; Ribeiro, J.F. 1998. Cerrado: Espécies Vegetais Úteis. EMBRAPA/CPAC, Brasília, DF, Brazil.
- Andrade, M. L. F. Deficiência nutricional em três espécies florestais nativas brasileiras. Piracicaba, 2010. 156 p. (Dissertação de Mestrado Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo)

- Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE. Panorama Nacional dos Resíduos Sólidos 2017. São Paulo, 2017. Disponível em <http://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 19 de setembro de 2019.
- Braga, F.A.; Vale, F.R. do; Ventorin, N.; Aubert, E.; Lopes, G.A. 1995. Exigências nutricionais de quatro espécies florestais. *Revista Árvore*, 19(1): 18-31.
- Brançalion, P. H. S.; Tay, D.; Novembre, A. D. L. C.; Rodrigues, R. R.; & Marcos Filho, J. (2010). Priming of pioneer tree *Guazuma ulmifolia* (Malvaceae) seeds evaluated by an automated computer image analysis. *Scientia Agricola*, 67(3), 274-279. <https://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162010000300004>
- Brançalion, P. H. S; Viani, R. A. G.; Calmon, M.; Carrascosa, H.; Rodrigues, R. R. (2013). How to Organize a Large-Scale Ecological Restoration Program? The Framework Developed by the Atlantic Forest Restoration Pact in Brazil. *Journal of Sustainable Forestry*, vol. 32 - Issue 7: Governance, Landscapes and Livelihoods: Innovations in Tropical Forest Restoration, pp 728-744. <https://doi.org/10.1080/10549811.2013.817339>
- Benayas, J. M. R., Newton, A. C., Diaz A., Bullock, J. M. (2009). Enhancement of Biodiversity and Ecosystem Services by Ecological Restoration: A Meta-Analysis. *Science*, vol. 325, Issue 5944, pp. 1121-1124. <https://doi.org/10.1126/science.1172460>
- Beutler, A. N.; Fernandes, L. A., Faquin, V. (2001). Efeito do alumínio sobre o crescimento de duas espécies florestais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 25:923-928.
- Campoe, O. C., Iannelli, C., Stape, J. L., Cook, R. L., Mendes, J. C. T., Vivian, R., 2014. Atlantic forest tree species responses to silvicultural practices in a degraded pasture restoration plantation: From leaf physiology to survival and initial growth. *For. Ecol. Manage.* 313, 233-242.
- Campoe, O. C., Stape, J. L., Mendes, J. C. T., 2010. Can intensive management accelerate the restoration of Brazil's Atlantic forests? *For. Ecol. Manage.* 259, 1808-1814.
- Carvalho P.E.R. Mutamba: *Guazuma ulmifolia*. Colombo: Embrapa Florestas, 2007. 13p.
- Carvalho, P. E. R. Pau-jacaré (*Piptadenia gonoacantha*). Colombo: PR: EMBRAPA, 2004. 12 p. (Embrapa florestas. Documentos, 91).
- Cediel-Devia, D., Sandoval-Lozano, E. & Castañeda-Serrano, R. Effects of different regrowth ages and cutting heights on biomass production, bromatological composition and in vitro digestibility of *Guazuma ulmifolia* foliage. *Agroforest Systems* (2019), pp. 1-10. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00354-y>

- Chaer, G. M., Resende, A. S., Campello, E. F. C., Faria, S. M., Boddey, R. M. Nitrogen-fixing legume tree species for the reclamation of severely degraded lands in Brazil, 2011. *Tree Physiology* 31, 139–149. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpq116>.
- Chandara, C.; Azizli K. A. M.; Ahmad, Z. A.; Sakai, E. (2009). Use of waste gypsum to replace natural gypsum as set retarders in portland cement. *Waste management* (New York, N.Y.). 29. 1675-9. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.11.014>
- DeSutter, T, Goosen-Alix, P, Prunty, L. (2011) Smooth brome (*Bromus inermis* Leyss) and soil chemical response to concrete grinding residue application. *Water, Air, & Soil Pollution* 222: 195–204.
- 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. [https://doi.org/10.1016/S0584-8547\(00\)00165-8](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(00)00165-8)
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, Sistema brasileiro de classificação de solos: 5. ed.: 1-353. EMBRAPA, Brasília. 2018.
- EMBRAPA, EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solos. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 230 p., 2017.
- FAO, 2014. World Reference Base for Soil Resources. IUSS, ISRIC, FAO, Rome.
- Ferreira, W. C., Botelho, S. A., Davide, A. C., & Faria, J. M. R. (2007). Avaliação do crescimento do estrato arbóreo de área degradada revegetada à margem do Rio Grande, na Usina Hidrelétrica de Camargos, MG. *Revista Árvore*, 31(1), 177-185. <https://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622007000100020>
- 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.
- Góes, L. G.; Quintela, M. F. Florística e estrutura de um reflorestamento no maciço da Tijuca, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. *Revista Internacional de Ciências*, [s.l.], v. 5, n. 1, p. 106 - 126, jul. 2015. Issn 2316-7041. <https://doi.org/10.12957/ric.2015.16690>.
- Gómez-Pompa, A.; Wiechers, B. L. Regeneracion de los ecosistemas tropicales y subtropicales. In: Gómez-Pompa, A.; Amo, R. S. (Eds.). *Investigaciones sobre la regeneración de las selvas altas en Vera Cruz, México*. México: Companhia Editorial Continental, 1979. p. 11-30.

- Gonçalves, J. L. M.; Freixêdas, V. M.; Kageyama, P. Y.; Gonçalves, J. C.; Dias, J. H. P. Produção de biomassa e sistema radicular de espécies de diferentes estágios sucessionais. In: Congresso Nacional sobre Essências Nativas, 2., 1992, Campos do Jordão. Anais... São Paulo: instituto Florestal, 1992. P.363-367.
- Gu, L.-P., Kong, J.-J., Chen, K., Guo, Y.-Q. Monitoring soil biological properties during the restoration of a phosphate mine under different tree species and plantation types. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Volume 180, 130-138. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.05.001>
- Chaer, G. M.; Resende, A. S.; Campello, E. F. C.; Faria, S. M.; Boddey, R. M., Nitrogen-fixing legume tree species for the reclamation of severely degraded lands in Brazil, *Tree Physiology*, Volume 31, Issue 2, February 2011, Pages 139–149, <https://doi.org/10.1093/treephys/tpq116>
- Hernández, W., Xavier, A., Paiva, H. N., & Wendling, I. (2012). Propagação vegetativa do pau-jacaré (*piptadenia gonoacantha* (MART.) MACBR.) por estaquia. *Revista Árvore*, 36(5), 813-824. <https://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622012000500003>
- Kelly, J.A., Samways M.J. Diversity and conservation of forest-floor arthropods on a small Seychelles island. *Biodivers. Conserv.*, 12 (2003), pp. 1793-1812. DOI: 10.1023/A:1024161722449
- Kerbauy, G. B. *Fisiologia vegetal*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2004.
- Kluge, M., Gupta, N., Watts, B., Chadik, P.A., Ferraro, C., Townsend, T.G., 2018. Characterisation and management of concrete grinding residuals. *Waste Manag. Res.* 36, 149–158. <https://doi.org/10.1177/0734242X1774>
- 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. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180229291022>
- Lorenzi, H. 2002. *Árvores Brasileiras: Manual de Identificação e Cultivo de Plantas Arbóreas do Brasil*. v2. Instituto Plantarum, Nova Odessa, SP, Brazil.
- Machado, M. C. Resíduos de construção e demolição como substrato para plantas: avaliação química e ambiental. Piracicaba, 2016. 131 p. (Tese de Doutorado Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo)
- Malavolta, E. *Elemento de nutrição mineral de plantas*. Agronômica Ceres. Piracicaba. 252 p, 1980.
- Malavolta, E. *Manual de nutrição mineral de plantas*. Agronômica Ceres. São Paulo. 638p, 2006.

- Manríquez-Mendoza LY, López-Ortíz S, Pérez-Hernández P et al (2011) Agronomic and forage characteristics of *Guazuma ulmifolia* Lam. *Trop Subtrop Agroecosyst* 14:453–463.
- Mehlich, A. (1984): Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 15:12, 1409-1416. <http://dx.doi.org/10.1080/00103628409367568>
- Nelson, D.W., Sommer, L.E. (1982) Total Carbon, Organic Carbon and Organic Matter. *Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties*, 2nd Edition. ASA-SSSA, Madison, 595-579.
- Orlandi Lasso, P. R.; Pedro Vaz, C. M.; de Campos Bernardi, A. C.; Ribeiro de Oliveira, C.; Santos Bacchi, O. O. Avaliação do uso de resíduos de construção e demolição reciclados como corretivo da acidez do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 37, núm. 6, 2013, pp. 1659-1668. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180229291022>
- Osaki, F. Calagem e adubação. Campinas: Instituto Brasileiro de Ensino Agrícola, 1991. 503 p.
- Pérez-Gimeno, A., Navarro-Pedreño, J., Almendro-Candel, M., Gómez, I., Zorpas, A. (2019). The use of wastes (organic and inorganic) in land restoration in relation to their characteristics and cost. *Waste Management & Research*. Vol. 37(5) 502–50. <https://doi.org/10.1177/0734242X19828171>
- Pires, H.R.A, Franco, A. C., Piedade, M. T. F., Scudeller V. V., Kruijt B., Ferreira, C. S. Flood tolerance in two tree species that inhabit both the Amazonian floodplain and the dry Cerrado savanna of Brazil, *AoB PLANTS*, Volume 10, Issue 6, December 2018, ply065, <https://doi.org/10.1093/aobpla/ply065>
- Presotto, R. A.; Pereira, M. G.; Zonta, E.; Mattiello, E. M. Influência do Al³⁺ em solução nutritiva no crescimento de três espécies florestais utilizadas na recuperação de áreas degradadas. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 28, n. 1, p. 384-392, jan.- mar., 2018.
- Ronquim, C. C. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (Embrapa Monitoramento por Satélite – Campinas*, 2010 26 p., ISSN 1806-3322.
- Rossi, C. Q. Matéria orgânica do solo e fósforo orgânico em cronosequência de cana-de-açúcar cultivada no Cerrado. *Seropédica*, RJ, 2013. 89 p. (Tese de Doutorado Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro)
- Séré, G., Schwartz, C., Ouvrard, S., Sauvage, C., Renat, J.-C., Morel, J.L., 2010. Soil Construction: A Step for Ecological Reclamation of Derelict Lands. *J Soils Sediments*, v. 8, n. 82, p. 130–136, 2008. <https://doi.org/10.1065/jss2008.03.277>

- Souza, F. M.; Batista, J.L.F. 2004. Restoration of seasonal semideciduous forests in Brazil: influence of age and restoration design on forest structure. *Forest Ecology and Management* 191: 185-200.
- Ulsen, C., Kahn, H., Angulo, S. C., & John, V. M. (2010). Composição química de agregados mistos de resíduos de construção e demolição do Estado de São Paulo. *Revista Escola de Minas*, 63(2), 339-346. <https://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672010000200019>
- Viani, R. A. G.; Rodrigues, R. R.; Dawson, T. E.; Lambers, H.; Oliveira, R. S. Soil pH accounts for differences in species distribution and leaf nutrient concentrations of Brazilian woodland savannah and seasonally dry forest species. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 16 (2014), pp. 67-74. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2014.02.001>

3. PROPOSIÇÃO DE UM ÍNDICE DE QUALIDADE DO SOLO PARA TECNOSSOLOS FORMADOS A PARTIR DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

RESUMO

A qualidade do solo pode ser mensurada através da integração de indicadores químicos, físicos e biológicos do solo em um índice (valor). Embora existam índices de qualidade do solo (IQS) para sistemas agrícolas e florestais e até para solos de mina, ainda não existem equações para o cálculo da qualidade de Tecnessolos elaborados com resíduos da construção civil (RCC) que serão utilizados na recuperação de áreas degradadas. Os Tecnessolos são classificados pela Base de Referência Mundial para Recursos do Solo (WRB/FAO) e podem ser elaborados “sob medida”, com um propósito, através da mistura de vários resíduos. Estes Tecnessolos “sob medida” podem proporcionar condições físicas, químicas e biológicas adequadas para o crescimento das plantas. O presente trabalho objetivou a elaboração de um IQS para Tecnessolos elaborados principalmente com RCC, além de avaliar o potencial destes Tecnessolos em proporcionar uma qualidade física, química e biológica apropriada para o estabelecimento e desenvolvimento de espécies arbóreas nativas do Brasil. O experimento foi conduzido em casa de vegetação durante quatro meses. Os Tecnessolos foram elaborados com RCC, com e sem adição de composto orgânico. Além disso, poderiam ter ou não a adição de biofertilizante líquido comercial nestas combinações. Utilizou-se como controle um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico. Foram realizadas análises químicas, físicas e biológicas dos solos para a seleção de indicadores. Em seguida, estes indicadores foram integrados em uma equação a qual definiu o índice de qualidade, em porcentagem, de todos os Tecnessolos e do solo controle. Os Tecnessolos apresentaram um IQS maior que o solo controle, sendo que os Tecnessolos com RCC e composto orgânico apresentaram os maiores índices. Os resultados demonstram que além dos RCC fornecerem elementos químicos essenciais para as plantas, a presença do composto orgânico aumenta tanto as concentrações destes nutrientes e do carbono orgânico total nos solos, quanto as atividades das enzimas presentes e do carbono da biomassa microbiana. O sistema “Tecnessolo construído com RCC + árvores nativas” pode ser utilizado para recuperar áreas onde houve perda ou degradação de solo, visto que a qualidade destes Tecnessolos são superiores à de um Latossolo.

Palavras-chave: Indicadores químicos, Indicadores físicos, Indicadores biológicos, Espécies pioneiras, Solos construídos; Resíduos sólidos

ABSTRACT

Soil quality can be measured by integrating chemical, physical and biological soil indicators into an index (value). Although there are soil quality index (SQI) for agricultural and forestry systems, and even for the mine soils, there are no equations for calculating the quality of soils prepared with construction and demolition debris (C&DD) that will be used to recover degraded areas. Technosols are classified by the World Reference Base for Soil Resources (WRB/FAO) and can be made for one purpose by mixing various wastes. These customized Technosols can provide physical, chemical and biological conditions for plant growth. The present work aimed the creation of an SQI for Technosols elaborated mainly with C&DD, besides evaluating the potential of these soils to provide an appropriate physical, chemical and biological quality for the establishment and development of native tree species in Brazil. The experiment was conducted in a greenhouse for four months. The Technosols were prepared with C&DD, with and without the addition of compost. In addition, they have or not a liquid biofertilizer. A Ferralsol was used as a control. Chemical, physical and biological soil analyzes were performed to select indicators. Then, these indicators were integrated into an equation, which defined the quality index, as a percentage, of all Technosols and control soil. The Technosols had an SQI higher than the control soil, and the Technosols with C&DD and compost presented the highest indexes. The results show that C&DD provided essential chemical elements to plants and, in addition, the presence of compost increases both the concentrations of these nutrients and total organic carbon in soils, as well as the activities of the enzymes and carbon microbial biomass. The "Technosol made with C&DD + native trees" system can be used to recover areas where there was loss or degradation of soil, since the quality of these Technosols is higher than a Ferralsol.

Keywords: Chemical indicators, Physical indicators, Biological indicators, Pioneer species, Constructed soils, Residues

3.1 INTRODUÇÃO

De acordo com Karlen et al. (1997) o termo qualidade do solo é definido como a capacidade de um tipo específico de solo, dentro dos limites naturais ou gerenciados do ecossistema, de sustentar a produtividade das plantas e dos animais, manter ou melhorar a qualidade da água e do ar e apoiar a saúde e a habitação humana. Pelo fato de necessitar de um número razoável de variáveis, a qualidade do solo não pode ser medida diretamente no campo ou em laboratório, mas pode ser estimada a partir de indicadores de qualidade do solo arbitrados pelo ser humano. Estes indicadores podem mensurar quantitativamente os atributos químicos, físicos e biológicos do solo efetuando-se a comparação com valores desejáveis em diferentes intervalos de tempo, com uma finalidade específica em diversos ecossistemas (Karlen et al., 1997; Andrews et al., 2004; Araújo et al. 2012; Cherubin et al., 2016).

Na avaliação da qualidade do solo tem se dado ênfase na elaboração de um índice (valor) através da integração de indicadores (Karlen e Stott, 1994). Esse método quantitativo foi considerado importante devido a sua fácil aplicação e flexibilidade de uso (Karlen e Stott, 1994; Araújo et al., 2012; Cherubin et al., 2016). De acordo com Rovedder et al. (2009) a manutenção de índices elevados de qualidade do solo é uma premissa para o estabelecimento da sustentabilidade de qualquer sistema produtivo.

Além disso, é importante salientar que diferentes atributos do solo são requeridos para avaliação da sua qualidade dependendo do tipo de uso do solo (Asensio et al., 2013). Ademais, uma ampla variedade de propriedades químicas, físicas e biológicas do solo pode ser medida, porém devido ao custo, é necessário selecionar um conjunto mínimo de dados (CMD) com maior influência na qualidade do solo. Para esta seleção, há algumas estratégias estatísticas como análise de componentes principais por exemplo, entre outras (Cherubin et al., 2016).

O CMD pode ser usado para desenvolver uma equação que calcule um índice de qualidade do solo (IQS), o qual permite comparações entre as condições de diferentes solos (Asensio et al., 2013). Estudos anteriores desenvolveram IQS para sistemas agrícolas ou florestais (Amacher et al., 2007; Cherubin et al., 2016) e até para solos de mina (Asensio et al., 2013; Mukhopadhyay et al., 2014).

Existem inúmeros casos onde o solo está degradado (por exemplo contaminado, ou fisicamente desestruturado) ou houve perda total de solo (por exemplo, em áreas de mineração). Uma das estratégias para recuperar ou adicionar solo é o uso de solos construídos artificialmente através da combinação “sob medida” de resíduos orgânicos e rejeitos minerais provenientes de diversas atividades antrópicas, a fim de proporcionar condições adequadas para o crescimento das plantas (Séré et al., 2008). Alguns estudos mostraram que esses solos construídos melhoram a qualidade física, química e/ou biológica de solos degradados (Calace et al. 2005; Battaglia et al. 2007; Asensio et al. 2013; Velayoudon et al. 2014; Rodríguez-Vila et al. 2015; Mingorance et al. 2017; Forján et al. 2018), enquanto outros estudos, demonstraram que estes solos construídos eram apropriados para formar uma camada de solo em locais onde houve perda (Rokia et al., 2014; Egendorf et al., 2018).

Os solos construídos podem ser classificados como Tecnosolos e sua classificação, segundo a Base de Referência Mundial para Recursos do Solo (FAO, 2014) destaca que estes solos devem conter 20% ou mais (em volume) de artefatos (origem antropogênica) nos primeiros 100 cm da superfície do solo ou a rocha contínua ou uma camada cimentada. Apesar de existir inúmeros trabalhos sobre o efeito de Tecnosolos elaborados com resíduos em solos degradados, ainda não foram estudados quando elaborados com resíduos da construção civil (RCC). Portanto, também não existem estudos que avaliem a qualidade de Tecnosolos elaborados com esse tipo de resíduos.

Os RCC representam um grave problema em muitas cidades do Brasil e do mundo devido a sua disposição irregular gerando problemas de ordem ambiental, estética e de saúde pública (Bernardes et al., 2008). Apesar de serem considerados resíduos de baixa periculosidade, os RCC, devido ao grande volume gerado, consistem em um problema ambiental uma vez que precisam ser depositados adequadamente em locais apropriados (Brasil, 2002). No Brasil, o destino final da maior parte dos RCC ainda são os lixões e aterros inertes (Brasil, 2002).

Visto a carência de estudos sobre Tecnosolos no Brasil, apenas 11 publicações internacionais até 2018 (de acordo com a base Scopus; www.scopus.com), e os problemas ambientais acerca da destinação dos RCC, o presente trabalho buscou atrelar estes dois temas. Neste contexto, os principais objetivos foram: i) elaborar um IQS para Tecnosolos elaborados com resíduos da

construção civil e, ii) avaliar o potencial desses Tecnosolos para proporcionar uma qualidade física, química e biológica apropriada para o estabelecimento e desenvolvimento de espécies arbóreas nativas do Brasil. Além disso, apresentou a seguinte hipótese: Tecnosolos elaborados a partir de resíduos da construção civil têm qualidade comparável ou superior a de solos naturais.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

3.2.1 Experimento em casa de vegetação

Para o presente estudo quatro diferentes Tecnosolos construídos à base de resíduos da construção civil foram testados: TEC1 (100% resíduos da construção civil - RCC); TEC2 (100% RCC + biofertilizante líquido comercial - BL); TEC3 (60% RCC + 40% composto orgânico comercial - CO) e TEC4 (60% RCC + 40% CO + BL). Todos os tratamentos foram feitos em triplicatas e os vasos foram distribuídos aleatoriamente. Após o plantio das mudas, todos os tratamentos foram adubados com 80 mg kg⁻¹ de N na forma de ureia, de acordo com a recomendação de adubação descrita por Malavolta (2006). Os tecnossolos tiveram sua qualidade comparada a um tratamento com solo natural (SOLO) constituído de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico, classificado de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS, EMBRAPA, 2018);

Duas espécies arbóreas nativas foram selecionadas para o experimento em casa de vegetação: *Guazuma ulmifolia* Lam. (mutambo) e *Piptadenia gonoacantha* (Mart.) J. F. Macbr. (pau-jacaré). Ambas espécies pioneiras de crescimento rápido e amplamente utilizadas em projetos de restauração florestal (Carvalho, 2004; Souza e Batista, 2004; Carvalho, 2007; Sousa Pereira et al., 2012; Douterlungne et al., 2015; Brandes et al., 2016). As mudas das espécies foram cultivadas em vasos de polietileno de 5 kg, forrados com sacos plásticos.

O experimento permaneceu em casa de vegetação por 120 dias e durante este período, os vasos foram irrigados em dias alternados com 360 mL de água deionizada, exceto no primeiro dia de plantio e após 1 mês. Nestes dois dias, as mudas foram irrigadas com 240 mL de água deionizada e nos tratamentos que incluía a aplicação do biofertilizante líquido comercial, foram 240 mL de água deionizada + 12 mL de produto para atender a dosagem recomendada do fabricante de 400 L/ha para mudas de espécies arbóreas nativas de reflorestamento.

3.2.2 Avaliações na casa de vegetação

Para determinação de atributos físicos como densidades do solo e de partículas e por conseguinte porosidade total, macro e microporosidade, foram coletados anéis volumétricos de aço inoxidável com cerca de 90 cm³, os quais foram introduzidos diretamente no solo com o auxílio de um martelo revestido de borracha e retirados quando os vasos foram desmontados.

3.2.3 Análises de solo

Ao final do experimento, uma parte dos solos foi peneirada em malha de 2 mm, separada em sacos plásticos fechados hermeticamente e mantidos refrigerados para a realização das análises microbiológicas. As demais subamostras de solos foram deixadas em sacos plásticos abertos e secas ao ar (cerca de 15 dias) e em seguida, foram peneiradas em malha de 2 mm.

3.2.3.1 Análises químicas

Para a determinação dos teores biodisponíveis de cálcio (Ca), potássio (K), magnésio (Mg), fósforo (P), enxofre (S) foi realizada a extração com Mehlich-3 de acordo com Mehlich (1984) e feita a leitura dos extratos em um espectrômetro de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES). Determinou-se o pH em água na proporção 1:2,5 (peso:volume) com o uso de pH-metro e a CTC total (CTCt) de acordo com a metodologia da EMBRAPA (2017). A quantificação do carbono orgânico total (COT) nos solos foi realizada pelo método da via úmida de Walkley-Black (Nelson e Sommers, 1982).

3.2.3.2 Análises físicas

Os anéis volumétricos coletados nos vasos foram dispostos em uma bandeja com água até 2/3 de suas alturas durante 24 horas para ficarem saturados. Logo após atingirem a saturação, as amostras foram pesadas (P1) e submetidas a tensão de 6 KPa em câmaras de Richards, até serem totalmente drenadas. Seguidamente, foram pesadas (P2) e submetidas a tensão de 10 KPa, até a drenagem do efluxo cessar, e pesadas novamente (P3). Por fim, foram colocadas na estufa com temperatura de 105°C durante 48 horas e pesadas mais uma vez (P4), de acordo com a metodologia recomendada pela EMBRAPA (2017).

As determinações da densidade do solo (D_s), porosidade total (PT), microporosidade (Mi), macroporosidade (Ma) e capacidade de campo (CC) foram realizadas utilizando as eq. (1), eq. (2), eq. (3), eq. (4) e eq. (5).

$$D_s \text{ (g cm}^{-3}\text{)} = \frac{P_4 - \textit{tara do anel}}{\textit{Volume do anel}} \quad (1)$$

$$PT\% = \left[1 - \left(\frac{D_s}{D_p} \right) \right] \times 100 \quad (2)$$

$$Mi\% = \frac{(P_2 - \textit{tara do anel}) - (P_4 - \textit{tara do anel})}{\textit{Volume do anel}} \times 100 \quad (3)$$

$$Ma\% = PT\% - Mi\% \quad (4)$$

$$CC\% = \frac{(P_3 - \textit{tara do anel}) - (P_4 - \textit{tara do anel})}{\textit{Volume do anel}} \times 100 \quad (5)$$

A resistência do solo à penetração foi determinada em laboratório, utilizando um penetrômetro eletrônico desenvolvido no Laboratório de Física de Solos do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ/USP, com base no descrito por Bradford (1986). O penetrômetro é equipado com atuador linear-Electrak 2000 e célula de carga (981 N) acoplada, por meio de uma interface, a um microcomputador que utiliza software AQDXy (Lynx). Obtém-se uma velocidade constante de penetração de $0,167 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, em um cone com 4 mm de diâmetro da base ($12,56 \text{ mm}^2$) e ângulo sólido de 60° , armazenando um dado a cada segundo. A resistência à penetração foi obtida pelo quociente da força aplicada ao cone, medida pela célula de carga e pela área da base do cone.

Em seguida, os solos foram retirados dos anéis volumétricos e passados em peneiras de 2 mm para determinação da densidade de partículas (g cm^{-3}) das amostras pelo método do deslocamento de gás (Flint & Flint, 2002), utilizando um picnômetro a gás, modelo AccuPyc 1330 (Micromeritics Instrument Corporation ®).

Para a análise granulométrica, as amostras foram previamente submetidas ao pré-tratamento com peróxido de hidrogênio para remoção de matéria orgânica. Em seguida, utilizou-se como dispersante, uma solução de hexametáfosfato de sódio $0,038 \text{ mol L}^{-1}$ + hidróxido de sódio $0,1 \text{ mol L}^{-1}$. A fração areia foi separada por

peneiramento (malha 0,053 mm) e as frações argila e silte pelo método do densímetro (Gee e Or, 2002).

3.2.3.3 Análises microbiológicas

O método da fumigação-extração descrito por Vance et al. (1987) foi utilizado para estimar o carbono da biomassa microbiana (CBM) dos solos. Além disso, foram avaliadas as atividades de enzimas do solo associadas ao ciclo do fósforo (fosfatase ácida); do carbono (β -glucosidase) e do enxofre (arylsulfatase), utilizando os métodos descritos por Tabatabai (1994). Estes métodos baseiam-se na determinação colorimétrica do p-nitrofenol (coloração amarela) formado após a adição de substratos incolores específicos para cada enzima avaliada.

3.2.4 Desenvolvimento do IQS (Índice de Qualidade do Solo)

A avaliação da qualidade do solo contemplou três etapas sequenciais: i) seleção dos indicadores, ii) interpretação dos indicadores e iii) integração dos indicadores em um índice de qualidade do solo, seguindo metodologia descrita em Cherubin et al. (2016).

A seleção dos indicadores foi realizada baseada nos resultados da análise de componentes principais (Brejda et al., 2000). O conjunto de dados de possíveis indicadores de qualidade do solo incluiu pH em água, carbono orgânico total (COT), capacidade de troca de cátions total (CTCt), fósforo (P), cálcio (Ca), potássio (K), magnésio (Mg), enxofre (S), carbono da biomassa microbiana (CBM), β -glucosidase, arylsulfatase, fosfatase ácida, macroporosidade, microporosidade e resistência a penetração. Estas 15 variáveis foram selecionadas dentre todas as estudadas devido a sua relevância na qualidade dos solos, visto que foram selecionadas em diversos IQS elaborados para outros tipos de solo (Wienhold et al., 2004; Amacher et al., 2007; Asensio et al., 2013; Mastro et al., 2015; Cherubin et al., 2016; Mukhopadhyay et al., 2016).

3.2.5 Análises estatísticas

Todas as determinações analíticas foram realizadas em triplicada e os dados obtidos foram tratados estatisticamente utilizando o programa SPSS versão 20.0 para Windows. Foram realizadas análises de variância (ANOVA) e teste de

homogeneidade de variância. Em caso de homogeneidade, foi realizado um teste post hoc de diferença menos significativa (LSD). Se não houvesse homogeneidade era realizado o teste T3 de Dunnett.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram obtidos dois componentes principais (PCs) mediante rotação Varimax com Kaiser (Tabela 6). O critério de Kaiser indica que somente componentes com autovalores > 1 são retidos. Os autovalores da análise de componentes principais indicaram que os dois primeiros componentes (PC1 e PC2) foram responsáveis por 87,1% da variação dos dados.

As variáveis selecionadas para o conjunto mínimo de dados foram as que apresentaram os maiores pesos dentro de cada componente principal (Tabela 7). Os pesos selecionados estavam dentro de 10% do valor mais alto (usando valores absolutos). Quando mais de uma variável era selecionada mediante esse método, era realizada uma análise de correlações de Pearson para observar se estavam correlacionadas entre elas. Como no PC1 todas as variáveis estavam correlacionadas ($p < 0,05$) e no PC2 foi selecionada apenas uma variável, realizou-se outra estratégia para elaborar o IQS. Ao invés de selecionar as variáveis com os maiores pesos, foram selecionadas todas as variáveis ponderando a contribuição de cada variável no índice de acordo com o autovalor. Deste modo, as variáveis com maior autovalor poderiam influenciar mais no valor final da qualidade do solo. Portanto, o IQS foi elaborado com o autovalor de cada PC (Tabela 6), o peso de cada variável dentro de cada PC (Tabela 7) e a pontuação de cada variável para cada solo (Tabelas 8 e 9).

$$IQS = [(PC1 \sum_{i=1}^n W1Si) + (PC2 \sum_{i=1}^n W2Si)]$$

Em que, PC1 e PC2 são os autovalores de cada componente principal; W1 é o peso da variável para o PC1; W2 é o peso da variável para o PC2 e Si é a escore da variável.

Para calcular a pontuação de cada variável, assumiu-se como pontuação 1 para o tratamento que apresentou o valor mais alto para essa variável e nos outros foi calculado relativo a ele (Tabelas 8 e 9). Exceto para pontuar pH,

macroporosidade, microporosidade e resistência à penetração, uma vez que estas variáveis possuem comportamento de curva ótima, onde valores acima e abaixo dos ótimos diminuem a qualidade do solo. Para estas quatro variáveis, as pontuações foram calculadas baseadas no valor 1 designado como valor ótimo, com base na literatura (Canarache, 1989; Gonçalves, 1995; Rajj et al., 2001; Eberling et al., 2008).

Finalmente, para que o valor do IQS estivesse entre 0 e 100, o solo com maior IQS foi estabelecido com IQS=100 e os demais ponderados em relação a ele.

Os resultados das análises químicas tanto para os materiais utilizados para a elaboração dos Tecnosolos, o solo controle no início do experimento e os Tecnosolos e o solo controle no final do experimento com as espécies arbóreas, estão detalhados nas Tabelas 1, 2 e 3. Os resultados referentes as análises físicas estão demonstrados nas Tabelas 4 e 5 e os resultados das análises microbiológicas estão representados nas Figuras 1, 2, 3 e 4.

Tabela 1. Atributos químicos dos resíduos, da mistura e do solo controle no início do experimento - RCC (resíduos da construção civil); RCC+C.O (60% RCC + 40% composto orgânico comercial) e SOLO (Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico).

Atributos químicos	Unidade	RCC	RCC+C.O	SOLO
pH água		8,20±0,02	7,28±0,07	4,86±0,13
COT	g kg ⁻¹	4,61±0,00	416±49,7	3,28±0,94
CTCt	mmolc kg ⁻¹	433±37,8	741±43,2	70,2±2,50
Ca		7466±124	15570±989	62,9±3,23
K		137±1,10	1277±108	10,9±0,59
Mg	mg kg ⁻¹	1007±23,4	3091±223	24,2±0,23
P		13,8±1,06	187±25,9	3,71±0,83
S		2038±87,0	6382±419	23,7±1,46

COT: carbono orgânico total; CTCt: Capacidade de troca de cátions total; Ca: cálcio; K: potássio; Mg: magnésio; P: fósforo e S: enxofre.

Tabela 2. Atributos químicos do SOLO (Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico); TEC1 (100% resíduos da construção civil - RCC); TEC2 (100% RCC + biofertilizante líquido comercial - BL); TEC3 (60% RCC + 40% composto orgânico comercial - CO) e TEC4 (60% RCC + 40% CO + BL) com a espécie arbórea pau-jacaré (A), após fim do experimento (120 dias). Letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre tratamentos para cada atributo químico.

Atributos químicos	Unidade	Tratamento				
		SOLO A	TEC1A	TEC2A	TEC3A	TEC4A
pH água		5,57±0,23c	7,67±0,12ab	7,83±0,10a	7,32±0,10b	7,47±0,05ab
COT	g kg ⁻¹	3,79±0,99b	3,90±0,64b	4,41±1,08b	37,9±3,76a	40,0±2,13a
CTCt	mmolc kg ⁻¹	67,1±1,36c	231±2,28b	223±16,7b	528±30,1a	507±14,7a
Ca		68,0±7,32c	7013±59,7b	7107±178b	13020±387a	12850±1041a
K		16,6±1,09c	109±12,5b	104±7,72b	760±19,9a	768±62,4a
Mg	mg kg ⁻¹	21,5±0,25c	968±55,9b	968±43,8b	2236±81,6a	2166±54,7a
P		3,84±1,39c	17,3±2,41b	16,4±2,01b	194±13,5a	172±10,4a
S		17,8±1,10c	1120±90,9b	1028±68,3b	3941±64a	3835±118a

COT: carbono orgânico total; CTCt: Capacidade de troca de cátions total; Ca: cálcio; K: potássio; Mg: magnésio; P: fósforo e S: enxofre.

Tabela 3. Atributos químicos do SOLO (Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico); TEC1 (100% resíduos da construção civil - RCC); TEC2 (100% RCC + biofertilizante líquido comercial - BL); TEC3 (60% RCC + 40% composto orgânico comercial - CO) e TEC4 (60% RCC + 40% CO + BL) com a espécie arbórea mutambo (B), após fim do experimento (120 dias). Letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre tratamentos para cada atributo químico.

Atributos químicos	Unidade	Tratamento				
		SOLO B	TEC1B	TEC2B	TEC3B	TEC4B
pH água		5,29±0,07b	7,82±0,19a	7,66±0,06a	7,46±0,02a	7,44±0,04a
COT	g kg ⁻¹	4,10±0,47b	5,02±0,18b	5,02±0,47b	43,7±2,22a	42,4±4,80a
CTCt	mmolc kg ⁻¹	66,5±2,27c	308±36,9b	289±9,58b	587±13,6a	570±33,2a
Ca		50,3±3,91c	7296±76,7b	7314±202b	12977±311a	13233±483a
K		12,3±0,38c	113±2,95b	105±6,69b	711±51,0a	665±50,4a
Mg	mg kg ⁻¹	18,9±1,42c	1017±34,4b	1036±6,66b	2434±145a	2382±86,0a
P		2,64±0,40c	13,6±2,66b	12,6±1,20b	187±15,8a	161±15,0a
S		17,0±0,52c	1403±11,6b	1325±48,3b	4188±315a	4303±179a

COT: carbono orgânico total; CTCt: Capacidade de troca de cátions total; Ca: cálcio; K: potássio; Mg: magnésio; P: fósforo e S: enxofre.

Tabela 4. Atributos físicos dos tratamentos: SOLO (Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico); TEC1 (100% resíduos da construção civil - RCC); TEC2 (100% RCC + biofertilizante líquido comercial - BL); TEC3 (60% RCC + 40% composto orgânico comercial - CO) e TEC4 (60% RCC + 40% CO + BL) com a espécie arbórea pau-jacaré (A), após fim do experimento (120 dias). Letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre tratamentos para cada atributo físico.

Atributos físicos	Unidade	Tratamento				
		SOLO A	TEC1A	TEC2A	TEC3A	TEC4A
Textura		Franco Argilo Arenosa	Franco Arenosa	Franco Arenosa	Franca	Franco Argilosa
Areia		61,6	69,2	70,2	49,0	39,7
Silte	%	5,47	15,3	14,3	29,4	29,8
Argila		33,0	15,6	15,5	21,6	30,5
Densidade do solo (Ds)	(g cm ⁻³)	1,64±0,04a	1,53±0,07a	1,47±0,11a	1,02±0,07b	1,05±0,08b
Densidade de partículas (Dp)		2,73±0,03a	2,70±0,01a	2,71±0,02a	2,55±0,03b	2,53±0,01b
Porosidade total (Pt)		0,40±0,02b	0,43±0,03b	0,46±0,04ab	0,60±0,02a	0,59±0,03a
Capacidade de campo (CC)	cm ³ cm ⁻³	0,26±0,01b	0,26±0,03b	0,23±0,01b	0,33±0,00a	0,35±0,01a
Microporosidade		0,29±0,02b	0,29±0,02b	0,28±0,03b	0,39±0,03a	0,40±0,01a
Macroporosidade		0,11±0,04a	0,15±0,04a	0,18±0,07a	0,21±0,00a	0,19±0,04a
Resistência a penetração	MPa	0,67±0,07b	3,62±2,81a	1,87±1,04ab	0,76±0,08b	1,13±0,66ab

Tabela 5. Atributos físicos dos tratamentos: SOLO (Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico); TEC1 (100% resíduos da construção civil - RCC); TEC2 (100% RCC + biofertilizante líquido comercial - BL); TEC3 (60% RCC + 40% composto orgânico comercial- CO) e TEC4 (60% RCC + 40% CO + BL) com a espécie arbórea mutambo (B), após fim do experimento (120 dias). Letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre tratamentos para cada atributo físico.

Atributos físicos	Unidade	Tratamento				
		SOLO B	TEC1B	TEC2B	TEC3B	TEC4B
Textura		Franco Argilo Arenosa	Franco Arenosa	Franco Arenosa	Franca	Franco Argilosa
Areia		66,2	69,0	69,8	43,2	38,2
Silte	%	1,94	15,4	11,6	30,6	31,0
Argila		31,9	15,6	18,6	26,1	30,8
Densidade do solo (Ds)	(g cm ⁻³)	1,58±0,10a	1,52±0,08ab	1,43±0,03b	1,06±0,03c	1,06±0,03c
Densidade de partículas (Dp)		2,73±0,03a	2,73±0,04a	2,75±0,01a	2,58±0,11b	2,54±0,02b
Porosidade total (Pt)		0,42±0,04c	0,44±0,04bc	0,48±0,01b	0,59±0,03a	0,58±0,01a
Capacidade de campo (CC)	cm ³ cm ⁻³	0,20±0,01b	0,23±0,05ab	0,21±0,01b	0,35±0,03a	0,35±0,03a
Microporosidade		0,29±0,03ab	0,28±0,02b	0,26±0,02b	0,41±0,00a	0,42±0,01a
Macroporosidade		0,13±0,07b	0,17±0,06ab	0,22±0,02a	0,18±0,03ab	0,17±0,01ab
Resistência a penetração	MPa	0,77±0,36a	2,09±0,78a	1,66±0,61a	0,97±0,25a	1,18±0,23a

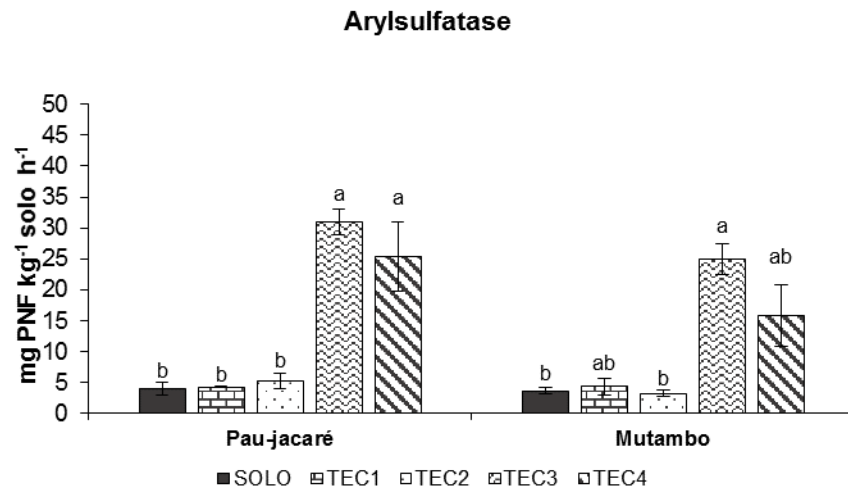


Figura 1. Atividade da enzima Arylsulfatase nos tratamentos: SOLO (Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico); TEC1 (100% resíduos da construção civil - RCC); TEC2 (100% RCC + biofertilizante líquido comercial - BL); TEC3 (60% RCC + 40% composto orgânico comercial - CO) e TEC4 (60% RCC + 40% CO + BL), com as espécies arbóreas pau-jacaré e mutambo, após fim do experimento (120 dias). Letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre tratamentos.

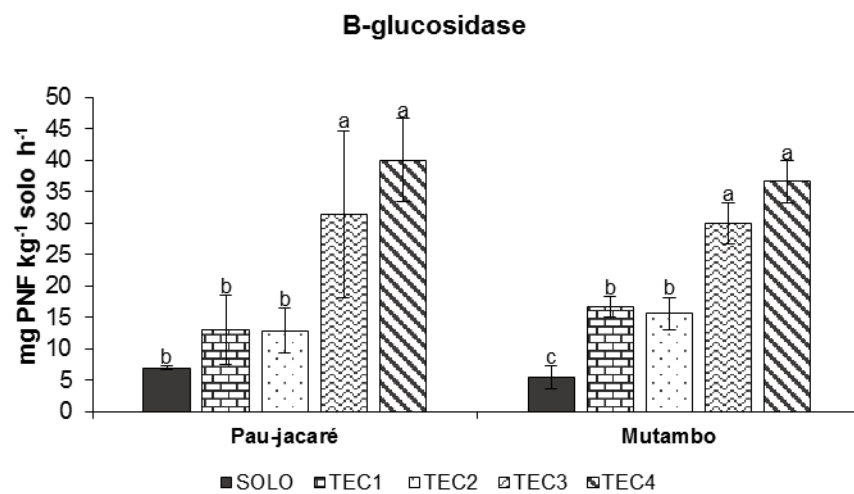


Figura 2. Atividade da enzima β -glucosidase nos tratamentos: SOLO (Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico); TEC1 (100% resíduos da construção civil - RCC); TEC2 (100% RCC + biofertilizante líquido comercial - BL); TEC3 (60% RCC + 40% composto orgânico comercial - CO) e TEC4 (60% RCC + 40% CO + BL), com as espécies arbóreas pau-jacaré e mutambo, após fim do experimento (120 dias). Letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre tratamentos.

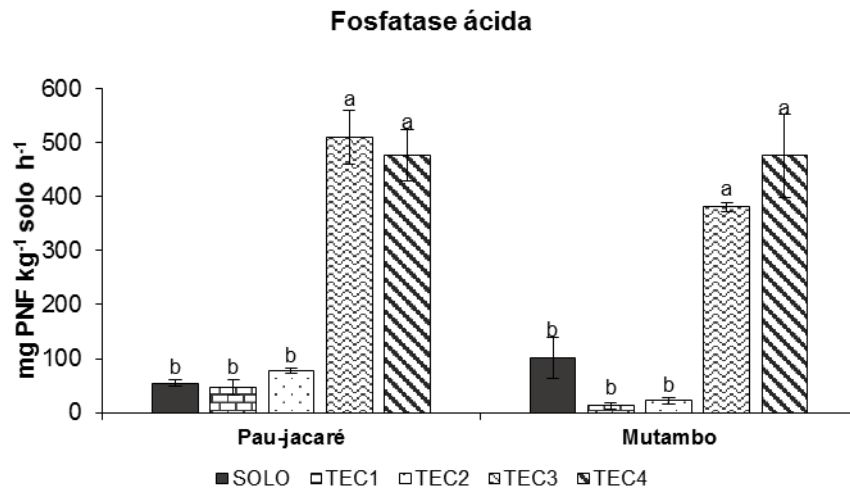


Figura 3. Atividade da enzima Fosfatase ácida nos tratamentos: SOLO (Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico); TEC1 (100% resíduos da construção civil - RCC); TEC2 (100% RCC + biofertilizante líquido comercial - BL); TEC3 (60% RCC + 40% composto orgânico comercial - CO) e TEC4 (60% RCC + 40% CO + BL), com as espécies arbóreas pau-jacaré e mutambo, após fim do experimento (120 dias). Letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre tratamentos.

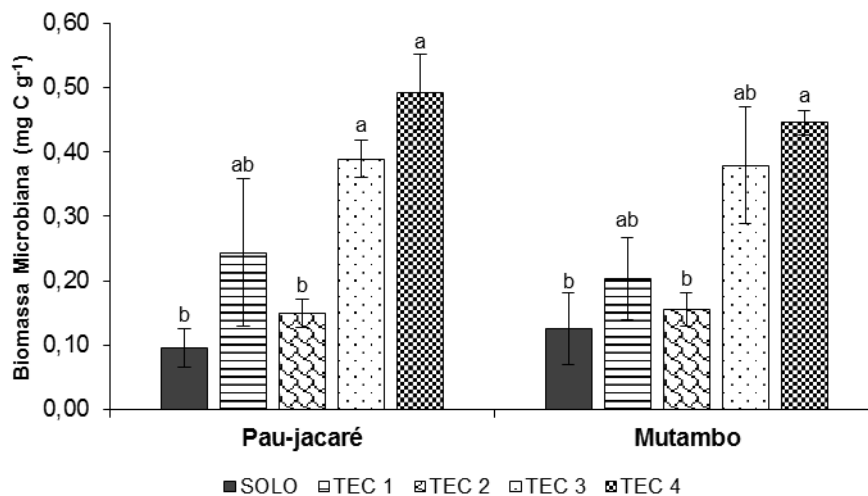


Figura 4. Teor de carbono da biomassa microbiana dos tratamentos: SOLO (Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico); TEC1 (100% resíduos da construção civil - RCC); TEC2 (100% RCC + biofertilizante líquido comercial - BL); TEC3 (60% RCC + 40% composto orgânico comercial - CO) e TEC4 (60% RCC + 40% CO + BL), com as espécies arbóreas pau-jacaré e mutambo, após fim do experimento (120 dias). Letras diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre tratamentos.

Na elaboração do índice de qualidade do solo (IQS) foram obtidos apenas dois componentes principais mediante rotação Varimax com Kaiser, que seleciona

apenas componentes que têm autovalores >1 (Tabela 6). Estes componentes (PC1 e PC2) foram responsáveis por 87,1% da variação dos dados (Tabela 6).

Embora todas as variáveis tenham sido selecionadas para fazer parte do IQS, cada uma teve um peso diferente na equação do índice e portanto, umas influenciaram mais do que outras no valor final. Em cada componente, as variáveis tiveram pesos diferentes. Por exemplo, no componente principal 1 (PC1) as variáveis com maior peso foram: carbono orgânico total (COT); capacidade de troca de cátions total (CTCt); fósforo (P); cálcio (Ca); magnésio (Mg); potássio (K); enxofre (S); carbono da biomassa microbiana (CBM); arylsulfatase; β -glucosidase; fosfatase ácida e microporosidade (Tabela 7). Já no componente 2 foram; pH em água; macroporosidade e resistência à penetração. É importante ressaltar que o PC1 teve maior peso na equação do que o PC2, porque o primeiro tem maior autovalor (Tabelas 6).

Tabela 6. Autovalores dos componentes extraídos mediante análise de componentes principais.

Componente	Autovalores iniciais			Soma da extração das cargas quadradas		
	Total	% da variação explicada	% de variação acumulada	Total	% da variação explicada	% de variação acumulada
1	11,181	74,543	74,543	11,181	74,543	74,543
2	1,886	12,575	87,118	1,886	12,575	87,118
3	0,984	6,559	93,677			
4	0,424	2,824	96,502			
5	0,194	1,293	97,795			
6	0,147	0,983	98,778			
7	0,067	0,444	99,222			
8	0,051	0,341	99,563			
9	0,019	0,129	99,693			
10	0,016	0,109	99,802			
11	0,013	0,087	99,889			
12	0,008	0,053	99,942			
13	0,005	0,033	99,975			
14	0,003	0,020	99,995			
15	0,001	0,005	100,000			

Tabela 7. Matriz de pontuação dos coeficientes dos componentes do PCA e pesos de cada variável.

	Componente Principal	
	1	2
pH água	0,249	0,908
COT	0,984	0,042
CTCt	0,903	0,388
P biodisponível	0,987	0,075
Ca biodisponível	0,835	0,530
K biodisponível	0,985	0,120
Mg biodisponível	0,905	0,403
S biodisponível	0,954	0,274
CBM	0,870	0,284
Arylsulfatase	0,927	0,028
β-glucosidase	0,889	0,245
Fosfatase ácida	0,973	-0,041
Microporosidade	0,952	-0,114
Macroporosidade	0,232	0,604
Resistência à penetração	-0,357	0,611

Tabela 8. Pontuações dos atributos químicos dos solos no índice de qualidade do solo (IQS).

Treatamento	pH água	Escore	COT	Escore	CTCt	Escore	P	Escore	Ca	Escore	K	Escore	Mg	Escore	S	Escore
SOLO A	5,57	0,88	3,79	0,09	67,1	0,11	3,84	0,02	68,04	0,01	16,6	0,02	21,5	0,01	17,8	0,00
SOLO B	5,29	0,83	4,10	0,09	66,5	0,11	2,64	0,01	50,32	0,00	12,3	0,02	18,9	0,01	17,0	0,00
TEC1A	7,67	0,83	3,90	0,09	231	0,39	17,3	0,09	7013	0,53	109	0,14	968	0,40	1120	0,26
TEC1B	7,82	0,81	5,02	0,12	308	0,52	13,6	0,07	7296	0,55	113	0,15	1017	0,42	1403	0,33
TEC2A	7,83	0,81	4,41	0,10	223	0,38	16,4	0,08	7107	0,54	104	0,14	968	0,40	1028	0,24
TEC2B	7,66	0,83	5,02	0,12	289	0,49	12,6	0,07	7314	0,55	105	0,14	1036	0,43	1325	0,31
TEC3A	7,32	0,87	37,9	0,87	528	0,90	194	1,00	13020	0,98	760	0,99	2236	0,92	3941	0,92
TEC3B	7,46	0,85	43,7	1,00	587	1,00	187	0,96	12977	0,98	711	0,93	2434	1,00	4188	0,97
TEC4A	7,47	0,85	40,0	0,92	507	0,86	172	0,88	12850	0,97	768	1,00	2166	0,89	3835	0,89
TEC4B	7,44	0,85	42,4	0,97	570	0,97	161	0,83	13233	1,00	665	0,87	2382	0,98	4303	1,00

Tabela 9. Pontuações dos atributos biológicos e físicos dos solos no índice de qualidade do solo (IQS).

Treatamento	CBM	Escore	Ayilsulfatase	Escore	β -glucosidase	Escore	Fosfatase ácida	Escore	Microp.	Escore	Macrop.	Escore	Resistência à penet.	Escore
SOLO A	0,10	0,19	4,02	0,13	6,92	0,17	54,7	0,11	0,29	0,87	0,11	0,65	0,67	1,00
SOLO B	0,12	0,25	3,70	0,12	5,47	0,14	100	0,20	0,29	0,86	0,13	0,79	0,77	1,00
TEC1A	0,24	0,50	4,30	0,14	13,0	0,32	46,7	0,09	0,29	0,85	0,15	0,89	3,62	0,69
TEC1B	0,20	0,41	4,37	0,14	16,6	0,42	12,3	0,02	0,28	0,82	0,17	0,99	2,09	1,00
TEC2A	0,15	0,30	5,36	0,17	12,9	0,32	77,2	0,15	0,28	0,82	0,18	0,91	1,87	1,00
TEC2B	0,16	0,32	3,24	0,10	15,6	0,39	22,0	0,04	0,26	0,77	0,22	0,74	1,66	1,00
TEC3A	0,39	0,79	31,0	1,00	31,4	0,78	510	1,00	0,39	0,86	0,21	0,79	0,76	1,00
TEC3B	0,38	0,77	24,9	0,81	29,9	0,75	381	0,75	0,41	0,82	0,18	0,91	0,97	1,00
TEC4A	0,49	1,00	25,4	0,82	40,0	1,00	477	0,93	0,40	0,84	0,19	0,89	1,13	1,00
TEC4B	0,45	0,90	15,8	0,51	36,6	0,92	476	0,93	0,42	0,81	0,17	1,00	1,18	1,00

A pontuação de cada variável selecionada foi calculada admitindo-se como pontuação igual a 1 (pontuação máxima) para aquela que apresentava o maior valor dentro de todos os tratamentos, em seguida, os demais valores eram ponderados em relação ao valor máximo 1 (Tabelas 8 e 9). Por exemplo, o TEC3B possui o maior valor de CTCt quando comparado com os demais tratamentos, assim, este tratamento tem o escore igual a 1, enquanto que os escores dos outros tratamentos foram calculados em relação a ele. No entanto, para pontuar variáveis como pH, macroporosidade, microporosidade e resistência à penetração utilizou-se como valores máximos (pontuação igual a 1) os valores de referência encontrados na literatura para cada uma destas variáveis (Canarache, 1989; Gonçalves, 1995; Raij et al., 2001; Eberling et al., 2008). De acordo com Gonçalves (1995) o valor de pH em água ideal para o crescimento de espécies florestais fica na faixa dos 6,1 a 6,6. Desta forma, estabeleceu-se como escore igual a 1, a média destes valores de pH que é 6,35. Assim, os valores de pH de todos os tratamentos foram ponderados em relação a este valor de referência 6,35 (Tabela 8). Tratando-se dos atributos físicos, por exemplo, Canarache (1989) determinou em seu estudo que o crescimento radicular das plantas começa a ser limitado em valores de resistência do solo a penetração maiores que 2,5 MPa. Neste caso, todos os tratamentos que apresentavam valores de resistência a penetração menores que 2,5 MPa, obtiveram escores iguais a 1 (valor máximo), enquanto que apenas o TEC1A, que apresentou valor maior que 2,5 MPa, teve sua pontuação calculada relativo a ele (Tabela 9).

Feito isso, calculou-se o IQS, utilizando a equação descrita na metodologia, para todos os Tecnosolos e para o solo controle com ambas as espécies arbóreas. Os resultados demonstraram que os Tecnosolos elaborados com resíduos da construção civil (RCC) e composto orgânico (TEC3 e TEC4) apresentaram um índice de qualidade do solo 73% maior que o do solo controle (SOLO), enquanto que os Tecnosolos elaborados apenas com RCC (TEC1 e TEC2) apresentaram um índice 18% maior que o do SOLO (Figura 5).

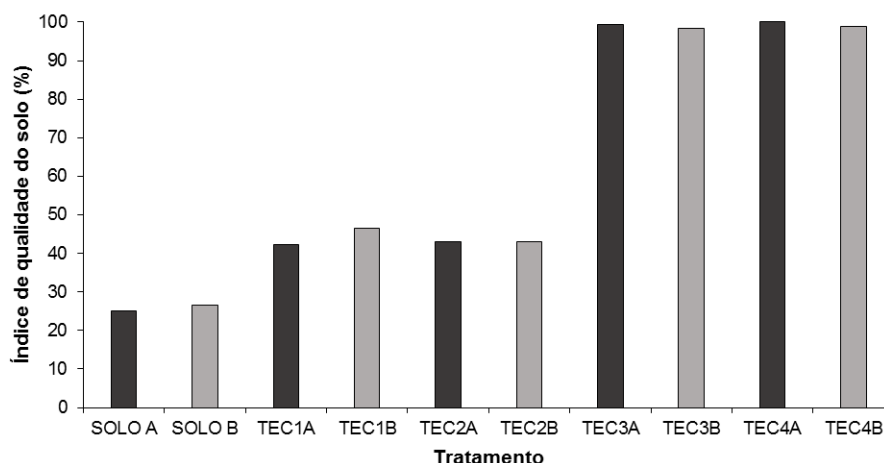


Figura 5. Índice de qualidade dos Tecossolos e do Solo nos tratamentos: SOLO (Latosolo Vermelho-Amarelo distrófico típico); TEC1 (100% resíduos da construção civil - RCC); TEC2 (100% RCC + biofertilizante líquido comercial - BL); TEC3 (60% RCC + 40% composto orgânico comercial - CO) e TEC4 (60% RCC + 40% CO + BL), com as espécies arbóreas pau-jacaré (A) e mutambo (B), após fim do experimento (120 dias).

Os TEC3 e TEC4 apresentaram um alto índice de qualidade de solos devido aos altos valores de CTCt, CBM, arylsulfatase; β -glucosidase; fosfatase ácida, além de altas concentrações de COT, P, Ca, K, Mg e S comparados tanto com o solo controle (SOLO) quanto com os TEC1 e TEC2. Essas variáveis tiveram pontuações próximas a 1, que é o máximo valor possível por variável (Tabelas 8 e 9). Portanto, os atributos químicos e biológicos tiveram um papel muito importante na qualidade dos Tecossolos com RCC e composto orgânico, enquanto que os atributos físicos não contribuíram significativamente para aumentar a qualidade em relação a um solo natural. Os resultados demonstram que nesses Tecossolos, além dos RCC fornecerem elementos químicos essenciais para as plantas, a presença do composto orgânico aumenta tanto as concentrações destes nutrientes e do carbono orgânico total nos solos, quanto as atividades das enzimas presentes e do carbono da biomassa microbiana (Tabela 1). Panico et al. (2019) já tinham observado que a adição de composto orgânico, a curto prazo, aumentou a atividade microbiana em Tecossolos derivados de entulhos de edifícios e materiais piroclásticos. De fato, as atividades das enzimas β -glucosidase e fosfatase ácida foram significativamente maiores ($p < 0,05$) nos TEC3 E TEC4 com ambas as espécies arbóreas comparadas com as do solo controle. Já a atividade da enzima arylsulfatase foi superior a do SOLO nos TEC3 com as duas espécies e no TEC 4 apenas com pau-jacaré. Por

outro lado, o teor de carbono da biomassa microbiana foi superior ($p < 0,05$) ao do solo controle no TEC4 com ambas as espécies e no TEC3 apenas com o pau-jacaré.

Os elevados valores de CTCt nesses Tecnosolos é devido à presença de grande quantidade de matéria orgânica proveniente do composto orgânico, a qual atua na disponibilização de nutrientes para as plantas, diminuindo as perdas por lixiviação (Brady, 1989). Além disso, solos com altos teores de matéria orgânica tendem a ter uma população microbiana maior, visto que o CBM geralmente compreende de 1% a 4% do carbono orgânico do solo, havendo uma correlação linear entre ambos (Jenkinson e Ladd, 1981; Longo et al., 2010). Os microorganismos atuam como agentes de transformações bioquímicas nos solos, além de serem um reservatório de nutrientes, como nitrogênio, fósforo e enxofre (Wardle, 1992; Longo et al., 2010). Desta forma, a biomassa microbiana está correlacionada diretamente com as atividades enzimáticas no solo, ciclagem de nutrientes, decomposição de resíduos orgânicos, degradação de poluentes, dentre outros processos do solo (Kaschuk et al., 2010). A biomassa microbiana, bem como as atividades enzimáticas no solo (β -glucosidase, fosfatase ácida e arylsulfatase) podem ser bons indicadores de recuperação de áreas degradadas, visto que possuem alta sensibilidade a mudanças na qualidade do solo (Longo et al., 2010).

Os resultados demonstraram ainda que os Tecnosolos com apenas RCC (TEC1 e TEC2) possuem valores maiores de CTCt, β -glucosidase, bem como concentrações mais altas de P, Ca, K, Mg e S que o solo controle, proporcionando a estes Tecnosolos um índice de qualidade superior ao SOLO. Novamente, a maior qualidade dos Tecnosolos parece ser devido aos atributos químicos e biológicos e não aos físicos. Isto pode ser explicado devido ao fato de dois dos três atributos físicos fazerem parte do PC2, que tem o menor autovalor, influenciando menos no valor do IQS. A microporosidade embora faça parte do PC1, teve valores muito similares em todos os solos, fato que também influenciou no valor final do índice (Tabela 9). Por outro lado, cabe ressaltar que os Tecnosolos elaborados apenas com RCC e cultivados com mutambo apresentaram maior atividade da enzima β -glucosidase do que o Latossolo, indicando que é possível ter uma qualidade biológica superior à de um solo natural sem adição de compostos orgânicos.

Os altos valores de CTCt dos Tecnosolos elaborados apenas com RCC, quando comparados com os do solo controle, podem ser explicados devido a

presença de minerais de argila 2:1 nos RCC, enquanto o Latossolo possui uma mineralogia predominantemente caulínica (minerais de argila 1:1) (SiBCS, EMBRAPA, 2018). Esta afirmação se deu através dos resultados obtidos pelo cálculo da atividade de argila dos Tecnosolos e do solo natural, o qual considera os valores de CTCt e a porcentagem de argila de cada solo (Tabelas 2, 3, 4 e 5). Os Tecnosolos apenas com RCC apresentaram atividades de argila variando entre 143 a 197 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ de argila, enquanto que no Solo, os valores ficaram entre 20 a 21 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ de argila. Valores maiores ou iguais a 27 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ indicam a presença de argilas de atividade alta (minerais 2:1) e valores inferiores a 27 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ indicam a presença de argilas de atividade baixa (minerais 1:1) (SiBCS, EMBRAPA, 2018). No entanto, mais estudos acerca da mineralogia dos RCC devem ser realizados.

Tratando-se dos atributos físicos considerados na elaboração do IQS, nota-se que em relação a resistência do solo a penetração, embora a grande maioria dos tratamentos tenham tido escores próximos a 1 (valor máximo), os solos naturais apresentaram valores de resistência a penetração significativamente menores do que a maioria dos Tecnosolos. Desta forma, é válido ressaltar que embora a maior parte dos valores esteja dentro do limite de referência estabelecido por Canarache (1989), o sistema radicular das plantas encontrará menos limitações ao seu crescimento nos solos naturais do que nos Tecnosolos.

Em relação a aplicação do biofertilizante líquido, este não mudou os resultados de qualidade dos solos (Figura 5), nem os atributos biológicos analisados (Figuras 1-4), apesar de ser composto por diversas bactérias.

3.4 CONCLUSÕES

Os solos construídos (Tecnossolos) têm sido utilizados como uma estratégia para a recuperação de áreas degradadas em diferentes países. Esta estratégia tem dois pontos positivos: a reutilização e revalorização de resíduos e a possibilidade de revegetação de áreas severamente degradadas. O nosso estudo mostra que é possível a construção de solos artificiais a partir de resíduos da construção civil (RCC) com qualidade comparável ou superior a de solos naturais.

Os Tecnosolos construídos no presente estudo apresentaram uma qualidade química e biológica (CTC total, carbono orgânico total, fósforo, cálcio, potássio, magnésio, enxofre, carbono da biomassa microbiana, β -glucosidase, arylsulfatase e fosfatase ácida) claramente superior ao solo natural usado como

controle (Latosolo Vermelho-Amarelo). Os resultados demonstraram que os Tecnosolos elaborados com resíduos da construção civil (RCC) e composto orgânico apresentaram um índice de qualidade do solo 73% maior que o do solo controle, enquanto que os Tecnosolos elaborados apenas com RCC apresentaram um índice 18% maior.

Adicionalmente é necessária a realização de estudos de campo acerca dos atributos físicos dos Tecnosolos estudados, visto que estes foram construídos em vasos e por um tempo muito curto de experimento para realizar a avaliação destes atributos.

REFERÊNCIAS

- Andrews, S.S.; Karlen, D.L.; Cambardella, C.A. The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. *Soil Science Society of America Journal*, v.68, p.1945-1962, 2004.
- Amacher M. C., O'Neill K. P., Perry C.H., Service F. 2007. Soil vital signs: A New soil quality index (SQI) for assessing forest soil health. Research paper RMRS/RP/65WWW. US Department of Agriculture, Fort Collins, CO.
- Araújo, E. A.; Ker, J. C.; Neves, J. C. L.; Lani, J. L. 2012. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. *Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias*, Guarapuava-PR, v.5, n.1, p.187-206, 2012.
- Asensio V.; Guala, S. D.; Vega F. A.; Covelo E. F. 2013. A soil quality index for reclaimed mine soils. *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 32, No. 10, pp. 2240–2248, 2013. <https://doi.org/10.1002/etc.2315>
- Battaglia A, Calace N, Nardi E, et al (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 . doi: 10.1016/j.biortech.2006.10.007
- Bernardes, A., Thomé, A., Prietto, P.D.M., de Abreu, A.G., 2008. Quantificação e classificação dos resíduos da construção e demolição coletados no município de Passo Fundo, RS. *Ambient. Construído* 8, 65–76.
- Bradford, J.M., 1986. Penetrability. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of soil analysis*. Part 1, second ed. *Agronomy Monograph* 9. ASA-SSSA, Madison, WI, pp. 436–478.
- Brady, N. C. *Natureza e propriedades dos solos*. 7. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989.

- Brandes, A. F. N., Albuquerque, R. P., Moraes, L. F. D., & Barros, C. F. (2016). Annual tree rings in *Piptadenia gonoacantha* (Mart.) J.F.Macbr. in a restoration experiment in the Atlantic Forest: potential for dendroecological research. *Acta Botanica Brasilica*, 30(3), 383-388. Epub July 14, 2016. <https://dx.doi.org/10.1590/0102-33062016abb0101>
- Brejda JJ, Karlen DL, Smith JL, Allan DL. 2000. Identification of regional soil quality factors and indicators: II. Northern Mississippi loess hills and Palouse prairie. *Soil Sci Soc Am J* 64:2125–2135.
- Calace N, Campisi T, Iacondini A, et al (2005) Metal-contaminated soil remediation by means of paper mill sludges addition: chemical and ecotoxicological evaluation. *Environ Pollut* 136:485–92 . doi: 10.1016/j.envpol.2004.12.014
- Canarache, A. PENETR - a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. *Soil & Tillage Research*. Amsterdam, 16 (1990) 51-70.
- Carvalho P.E.R. Mutamba: *Guazuma ulmifolia*. Colombo: Embrapa Florestas, 2007. 13p.
- Carvalho, P. E. R. Pau-jacaré (*Piptadenia gonoacantha*). Colombo: PR: EMBRAPA, 2004. 12 p. (Embrapa florestas. Documentos, 91).
- Cherubin MR, Karlen DL, Cerri CEP, Franco ALC, Tormena CA, Davies CA, et al. (2016) Soil Quality Indexing Strategies for Evaluating Sugarcane Expansion in Brazil. *PLoS ONE* 11(3): 0150860. doi:10.1371/journal.pone.0150860
- Douterlungne, D. , Ferguson, B. G., Siddique, I. , Soto-Pinto, L. , Jiménez-Ferrer, G. and Gavito, M. E. (2015), Microsite determinants of variability in seedling and cutting establishment in tropical forest restoration plantations. *Restor Ecol*, 23: 861-871. <https://doi.org/10.1111/rec.12247>
- Ebeling, A. G., & Anjos, Lúcia & Pérez, Daniel & Pereira, Marcos & Valladares, Gustavo. (2008). Relação entre acidez e outros atributos químicos em solos com teores elevados de matéria orgânica. *Bragantia*. 67. 10.1590/S0006-87052008000200019.
- Egendorf S. P., Cheng Z, Deeb M, et al (2018) Landscape and Urban Planning Constructed soils for mitigating lead (Pb) exposure and promoting urban community gardening : The New York City Clean Soil Bank pilot study. *Landsc Urban Plan* 175:184–194 . doi: 10.1016/j.landurbplan.2018.03.012
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, Sistema brasileiro de classificação de solos: 5. ed.: 1-353. EMBRAPA, Brasília. 2018.
- EMBRAPA, EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solos. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 230 p., 2017.
- FAO, 2014. World Reference Base for Soil Resources. IUSS, ISRIC, FAO, Rome.

- Flint, A. L.; Flint, L. E. Particle density. In: DANE, J. H; TOPP, G.C. (Ed). Methods of soil analysis: part 4 – physical methods. Madison: American Society of America, 2002. p. 229-240.
- Forján R, Rodríguez-vila A, Cerqueira B, et al (2018) Comparative effect of compost and technosol enhanced with biochar on the fertility of a degraded soil. *Environ Monit Assess* 190:610 . doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6997-4>
- 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. L. M. Recomendações de adubação para *Eucalyptus*, *Pinus* e espécies típicas da Mata Atlântica. Documentos Florestais, Piracicaba, 15: 1-23, 1995.
- Jenkinson, D. S.; Ladd, J. N. Microbial biomass in soil: measurement and turnover. In: Paul, E. A., Ladd, J. N. (Ed.). *Soil Biochemistry*, v.5, p.415-471, 1981.
- Karlen DL, Mausbach MJ, Doran JW, Cline RG, Harris RF, Schuman GE. 1997. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). *Soil Sci Soc Am J* 61:4–10.
- Karlen, D.L.; Stott, D. A framework for evaluating physical and chemical indicators. In: Doran, J.W.; Coleman, D.C.; Bezdicek, D.F.; Stewart, B.A. (Eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society American, 1994. Cap.4, p.53-72. (Special Publication, 35).
- Kaschuk, G.; Alberton, O.; Hungria, M. Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: Lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. *Soil Biology & Biochemistry* 42 (2010) 1–13p.
- Longo, R. M; Ribeiro, A. I.; Melo, W. J. Recuperação de solos degradados na exploração mineral de cassiterita: biomassa microbiana e atividade da desidrogenase. *Bragantia*, Campinas, v. 70, n. 1, p.132-138, 2010.
- Malavolta, E. Manual de nutrição mineral de plantas. Agronômica Ceres. São Paulo. 638p, 2006.
- Masto, R. E., Sheik, S., Nehru, G., Selvi, V. A., George, J., Ram, L. C., 2015. Assessment of environmental soil quality around Sonapur Bazari mine of Raniganj coalfield, India. *Solid Earth* 6, 811–821. <https://doi.org/10.5194/se-6-811-2015>
- Mehlich, A. (1984): Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 15:12, 1409-1416. <http://dx.doi.org/10.1080/00103628409367568>

- Mingorance M. D., Franco I, Rossini-Oliva S (2017) Application of different soil conditioners to restorate mine tailings with native (*Cistus ladanifer* L.) and non-native species (*Medicago sativa* L.). *J Geochemical Explor* 174:35–45 . doi: 10.1016/j.gexplo.2016.02.010
- Mukhopadhyay, S.; Maiti, S. K.; Masto, R. E. 2014. Development of mine soil quality index (MSQI) for evaluation of reclamation success: A chronosequence study. *Ecological Engineering*. 71:10-20.
- Mukhopadhyay, S., Masto, R. E., Yadav, A., George, J., Ram, L. C., Shukla, S.P., 2016. Soil quality index for evaluation of reclaimed coal mine spoil. *Sci. Total Environ*. 542, 540–550. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.035>
- Nelson, D. W., Sommer, L.E. (1982) Total Carbon, Organic Carbon and Organic Matter. *Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties*, 2nd Edition. ASA-SSSA, Madison, 595-579.
- Panico, S. C.; Memoli, V.; Napoletano, P.; Esposito, F.; Colombo, C.; Maistro, G.; Marco, A De. 2019. Variation of the chemical and biological properties of a Technosol during seven years after a single application of compost. *Applied Soil Ecology*, Vol. 138, p. 156-159.
- Raij, B. Van.; Andrade, J.C.; Cantarela, H.; Quaggio, J.A., *Análise química para a avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285p.
- Rodríguez-Vila A, Covelo E. F., Forján R., Asensio V. (2015) Recovering a copper mine soil using organic amendments and phytomanagement with *Brassica juncea* L. *J Environ Manage* 147:73–80 . doi: 10.1016/j.jenvman.2014.09.011
- Rokia S., Séré G., Schwartz C., et al (2014) Modelling agronomic properties of Technosols constructed with urban wastes. *Waste Manag* 34:2155–2162 . doi: 10.1016/j.wasman.2013.12.016
- Roverdder, A. P. M.; Eltz, F. L. F.; Drescher, M. S.; Schenato, R. B.; Antomiolli, Z. I. (2009) Organismos edáficos como bioindicadores da recuperação de solos degradados por arenização no Bioma Pampa. *Revista Ciência Rural*, Santa Maria, 39 (4): 1061-1068.
- Séré, G., Schwartz, C., Ouvrard, S., Sauvage, C., Renat, J.-C., Morel, J.L., 2010. Soil Construction: A Step for Ecological Reclamation of Derelict Lands. *J Soils Sediments*, v. 8, n. 82, p. 130–136, 2008. <https://doi.org/10.1065/jss2008.03.277>
- Souza, F. M.; Batista, J.L.F. 2004. Restoration of seasonal semideciduous forests in Brazil: influence of age and restoration design on forest structure. *Forest Ecology and Management* 191: 185-200.

- Sousa Pereira, J., Rezende de Abreu, C., Alves Pereira Junior, R., & Carlos Rodrigues, S. 2012. Avaliação do índice de sobrevivência e crescimento de espécies arbóreas utilizadas na recuperação de área degradada. REVISTA GEONORTE, 3(4), 138 - 148. Disponível em: <http://periodicos.ufam.edu.br/revista-geonorte/article/view/1813>.
- Tabatabai, M. A. Soil enzymes. In: WEAVER, R.W. Methods of soil analysis: microbiological and biochemical properties. Madison: ASA/SSA, 1994. p.775-883.
- Vance, E. D.; Brookes, P.C.; Jenkinson, D.S. An extraction method for measurement soil microbial biomass C. Soil Biology and Biochemistry, v.19, p. 703-707, 1987.
- Velayoudon P., Pagand P., Winterton P., Guiresse M (2014) Sewage sludge application for spontaneous plant restoration of a New Caledonian Ferralsol. Soil Res 52:76–86.
- Wienhold, B.J., Andrews, S.S., Karlen, D.L., 2004. Soil quality: a review of the science and experiences in the USA. Environ. Geochem. Health 26, 89–95.